

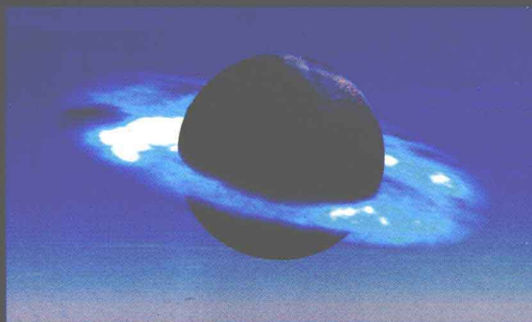
国际信息工程先进技术译丛



LTE自组织网络(SON)：网络管理自动化提升运维效率

LTE Self-Organising Networks(SON)Network Management Automation for Operational Efficiency

（芬） Seppo Hämäläinen
（德） Henning Sanneck 编著
Cinzia Sartori
王健全 乌云霄 王 波 张 猛 等译







机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

国际信息工程先进技术译丛

LTE 自组织网络（SON）：网络管理自动化提升运维效率

（芬）Seppo Hämäläinen
（德）Henning Sanneck　编著
（德）Cinzia Sartori
王健全　乌云霄　王　波　张　猛　等译



机 械 工 业 出 版 社

无线自组织网络（Self Organising Network，SON）通信技术可以有效帮助运营商降低网络运营维护成本，近年来已成为当今通信界的研究热点之一。本书内容是诺基亚西门子通信公司研发人员的心血结晶，主要阐述了SON技术在LTE网络中的发展，主要包括SON发展的动机、SON技术的标准化进程、SON的技术原理（如自配置、自优化和自愈功能及其原理）、SON协同技术、SON支撑功能MDT及SON在核心网中的应用。此外，本书还描述了SON未来研究课题，如认知无线网络、异构无线网络及云接入网络等。

本书是一部紧跟通信技术前沿研究的专业性著作，主要适于无线通信领域的研究人员和工程技术人员阅读，也可以作为通信工程及相关专业的高年级本科生、研究生和教师的专业新技术参考书。

本书版权登记号：图字01－2012－4224号

图书在版编目（CIP）数据

LTE自组织网络（SON）：网络管理自动化提升运维效率/（芬）哈马莱能（Hämäläinen，S.），（德）散勒克（Sanneck，H.），（德）萨特日（Sartori，C.）编著；王健全等译．—北京：机械工业出版社，2012.10

（国际信息工程先进技术译丛）

书名原文：LTE Self－Organising Networks（SON）Network Management Automation for Operational Eppiciency

ISBN 978-7-111-39936-0

Ⅰ.①L…　Ⅱ.①哈…　②散…　③萨…　④王…　Ⅲ.①无线电通信—移动网　Ⅳ.①TN929.5

中国版本图书馆CIP数据核字（2012）第234477号

机械工业出版社（北京市百万庄大街22号　邮政编码100037）

策划编辑：张俊红　责任编辑：顾　谦

版式设计：霍永明　责任校对：纪　敬

封面设计：马精明　责任印制：张　楠

北京京丰印刷厂印刷

2013年1月第1版第1次印刷

169mm×239mm · 22.5印张 · 503千字

0 001—3 000册

标准书号：ISBN 978-7-111-39936-0

定价：98.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务	网络服务
社服务中心：（010）88361066	教材网：http://www.cmpedu.com
销售一部：（010）68326294	机工官网：http://www.cmpbook.com
销售二部：（010）88379649	机工官博：http://weibo.com/cmp1952
读者购书热线：（010）88379203	**封面无防伪标均为盗版**

目　录

第1章 引 言

Cinzia Sartori, Henning Sanneck, Jürgen Goerge, Seppo Hämäläinen 和 Achim Wacker

在过去的十年中，移动通信用户数量增长迅猛，同时即使在用户数目趋近饱和的发达国家，无线业务量也仍在以前所未有的速度持续增长。

全球移动通信系统（Global System for Mobile communication, GSM）的应用推动了语音移动电话的普及，迄今为止，世界范围内移动通信网络的人口普及率已达90%。然而，GSM 的设计初衷为承载语音业务，对后增的数据业务支持能力不足。近年来，在第三代（3G）移动通信系统宽带码分多址（Wideband Code Division Multiple Access, WCDMA）、高速分组接入（High Speed Packet Access, HSPA）及增强型高速分组接入（High Speed Packet Access Plus, HSPA +）的驱动下，产生了“移动数据风暴”现象。HSPA 的引入标志着网络由语音业务为主向分组数据为主的转型开始。这些 3G 演进技术可以以相对较低的成本实现网络升级，因此在未来很长一段时间内仍将占据至关重要的地位。然而很显然，一项新的无线接入技术（Radio Access Technology, RAT）只有同时包括新的空中接口和新的网络架构，才是应付上述数据风暴的长久之计。2011 年，Holma 和 Toskala 的著作《长期演进（Long - Term Evolution, LTE)》尚未问世时，LTE 技术就已经推出并在几个国家投入商用。本书第 2 章将对 LTE 的关键技术理念及其无线接入网场景进行介绍。

既有业务和新型数据业务（如移动互联网接入、社交网络、基于位置的服务/个人导航等）的需求激增，又有先进终端（如智能终端、平板手写终端等）的强大数据处理和存储能力，致使移动宽带业务量呈指数级增长，如图 1.1 所示。用户终端

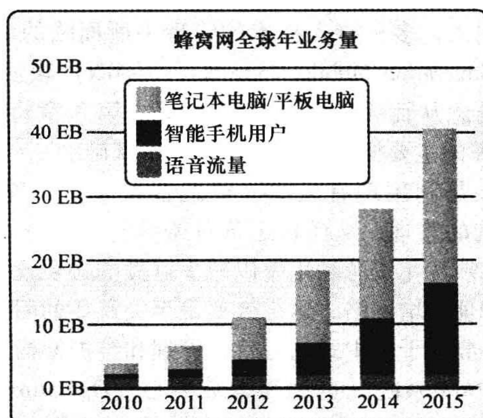


图 1.1 数据量增长趋势（来源：诺基亚西门子网络）

的“永久在线”以及 M2M（Machine to Machine，机对机通信）的网络应用也对网络的控制面处理能力提出了很高的要求。

下一阶段，平板手写电脑的使用很大程度上将可能引发无线视频应用需求的增加，同时也将对无线网络基础设施造成巨大压力。这种情况下，高分辨率显示器和强大的处理器将支持高清视频的传输，从而也导致对高数据传输速率“无处不在”的需求以满足终端用户的期望。这种“高数据量需求”的应用对网络容量和服务质量提出了更高要求，LTE 及其演进技术（LTE – Advanced，LTE – A）的引入则是必经之路。

面对巨大的数据量传输需求，无线网络运营商必须实现网络的显著升级以及网络资源的最高效利用。诸如宏基站密集部署、增强型接收机以及高阶化扇区等传统方式，无法满足业务量预测增长所需的容量。作为宏基站的补充，小基站的部署无疑是提升单位面积频谱效率（和容量）最为有效的解决方案。因此，预计在不久的将来，作为“异构网络”的典型场景之一，从宏基站单层拓扑向多层拓扑的迁移会进一步加快，此外 LTE 与 2G 和 3G 网络（多无线接入技术）也将长期共存。

无线业务提供商的所述要求，即对网络的升级、LTE 的部署以及对现有 RAT 的整合，均会造成网络整体结构趋于复杂化和异构化，因此运营商也将面临工作量以及成本方面的严峻挑战。不幸的是，单用户平均收入的降低（可能由激烈的市场竞争引起的统一费率等定价机制造成）将导致上述费用无法通过额外收入予以补偿。成本作为运营商利益攸关的问题，尤其是运营成本（Operational Expenses，OPEX），近期也得到了更加广泛的关注。特别在网络的早期部署阶段，网络建设和优化方面工作量巨大，系统需要较长时间才可达到最佳稳定状态。为了缩短时延、降低网络总体运营成本，自组织网络（Self – Organising Networks，SON）的概念成为了 LTE 的基本组成部分。

1.1 SON

随着 LTE 网络的引入，多种接入技术的管理中所面临的诸多问题可以预见，下一代移动网络（Next Generation Mobile Networks，NGMN）联盟引入了 SON 技术来应对这些挑战，SON 的概念从而得以频繁使用。本书第 3 章将对 SON 进行整体介绍（见 3.1 节），包括 SON 的主要概念、优势及其技术基础。

运营商的目标之一是利用现有运维人员配备和成本实现对上述多系统（包括 LTE）、多层次网络结构的管理，从而将运营负荷维持在现有水平。为最大限度地提高投资回报，运营商必须优化资源利用率以减少巨额的必要投资，因此，在不增加现网人员配备的情况下管理新增网络，运维效率是至关重要的因素。

当前，网络运维一般基于集中式的运营、管理和维护架构。网元的配置和优化由配备网规网优工具的 OAM 系统［也称为运维中心（Operations and Maintenance Centre，OMC）］来集中执行。典型的网规网优工具为半自动化，管理任务需要运维人员的严格监督。此类人工操作通常耗时长、成本高、易出错，且需要运维人员具备高级

的专业技能（Laiho 等人，2006 年）。

对已部署的网络资源的优化利用往往会造成网络结构的复杂化，而加强网络运维的自动化则是一种可能的解决方式。自动化的目标可描述如下：

1）将网络运维工作量维持在可以接受的水平；

2）在网络部署的整个阶段和网络管理的全过程中，通过减少差错概率实现对网络运维的保护；

3）加快运维流程。

自组织技术是实现此类自动化的一种先进机制。自动化功能与现有运维过程有效集成并嵌入 OAM 整体工具链是至关重要的。自动化可以通过将 SON 的功能加入到促进网络运维流程以及网络专有业务分发的网络设备中来实现。从这个意义上来说，SON 可使网络具备“可操作性”和“可用性”的特点。

基于 NGMN“支持 SON 的移动宽带网络”这一长期目标，3GPP 制定了实际的 SON 标准，定义了必要的用例、测量、流程和开放接口，以更好地支持多厂商环境下的可操作性。从 3GPP R8 版本 LTE 开始，R9 和 R10 版本（R10 版本已于 2011 年 6 月完成）继续跟进，SON 的标准化进程仍处于进行时（见图 1.2）。在写作本书时，R11 版本尚处于定义阶段，将在已有技术基础上包含 SON 的额外功能以及增强功能。

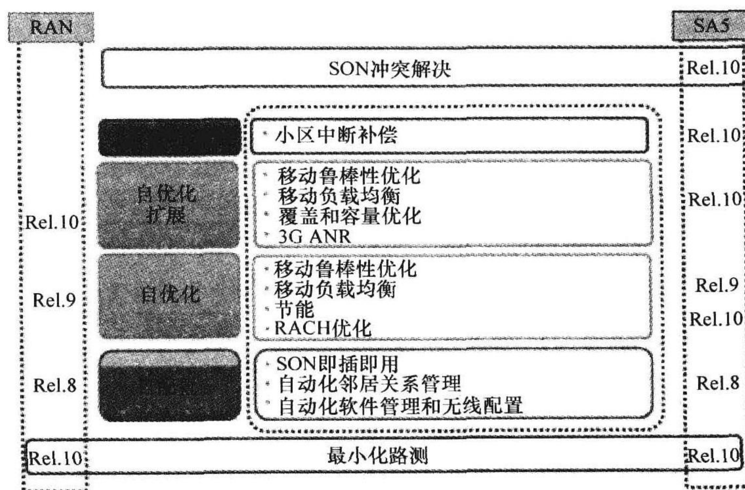


图 1.2 3GPP SON 标准化历程

SON 用例（NGMN，2008 年），参照 3.2 节，根据包括配置、优化和故障排查在内的关键 OAM 功能划分为不同的功能区（见图 1.3）：

1）自配置（第 4 章）；

2）自优化（第 5 章），包括不同类型无线资源间的业务操作；

3）自愈（第 6 章）。

一个共同的特点是：OAM 用例“含人回路（human - in - the - loop）”中人的作用程度已尽可能减小到一些用例中完全“闭环”的自动化。

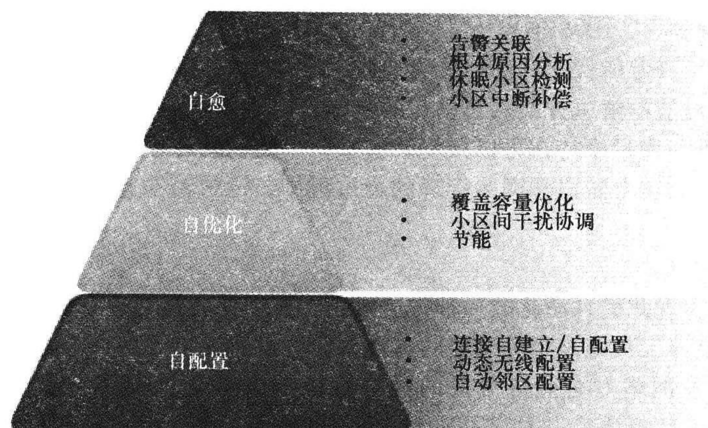


图 1.3　SON 用例实例

“最小化路测（Minitiation of Drive Tests，MDT）”功能在 3GPP R10 版本的 LTE 和通用陆地无线接入网络（Universal Terrestrial Radio Access Network，UTRAN）中已经标准化，强调路测在移动网络性能监测与评估中的必要性。由于实际测试需要大量运维人员介入，因此路测成本一般比较高。MDT 的主要特点是收集用户设备（User Equipments，UE）处可能包含位置信息的测量值，从而对小区性能有更细粒度的观测。此类观测不仅对运维人员有用，更有利于自动化 SON 功能的实现，因此 MDT 可以看作 SON 的重要推动者，其细节将在本书第 7 章中讨论。

SON 的研究和标准化工作主要集中在无线接入领域，源于无线接入网固有的复杂性（大量广泛部署的网元）及其在网络整体架构及运营方面的成本比重。然而从网络的合理配置以及端到端优化的角度来说，核心网中的 SON 技术也是非常重要的（见第 8 章）。需要注意的是，回传方面对端到端的贡献与本书第 4～6 章所讨论的 SON 功能相关。

图 1.3 给出了一些 SON 用例。相当数量的不同 SON 用例存在相互矛盾的实现目标、重叠的输入或输出参数等。这种 SON 功能的交互以及交互控制技术解决方案的实例将在第 9 章作为主要议题进行讨论。

如上所述，一方面，LTE 需要与现有的多种无线接入技术相整合；另一方面，LTE 宏小区的资源能力长远来看也将不足，需要通过微小区实现扩容。

异构网络下（见图 1.4），运营商将必须进行接入技术间和宏/微场景间的切换处理，而宏站/微微间以及宏站/微站间的干扰管理无疑是一个突出问题。与此同时，网络容量也需进行优化，在适当确保服务质量（Quality of Service，QoS）和用户体验（Quality of Experience，QoE）的前提下，可以通过（多接入技术、多层）可用资源的有效利用来实现。异构网络的 SON 技术以及相关挑战将在第 10 章进行介绍。

目前，业界正在对大多数“经典”SON 用例的理念予以评估，运营商也已经开始 SON 的部署，而同时通过新的用例以及基于现有技术和新技术的解决方案的整合，SON 的理念也在不断演进。本书第 11 章将对这一可能会引起真正“认知网络”的演

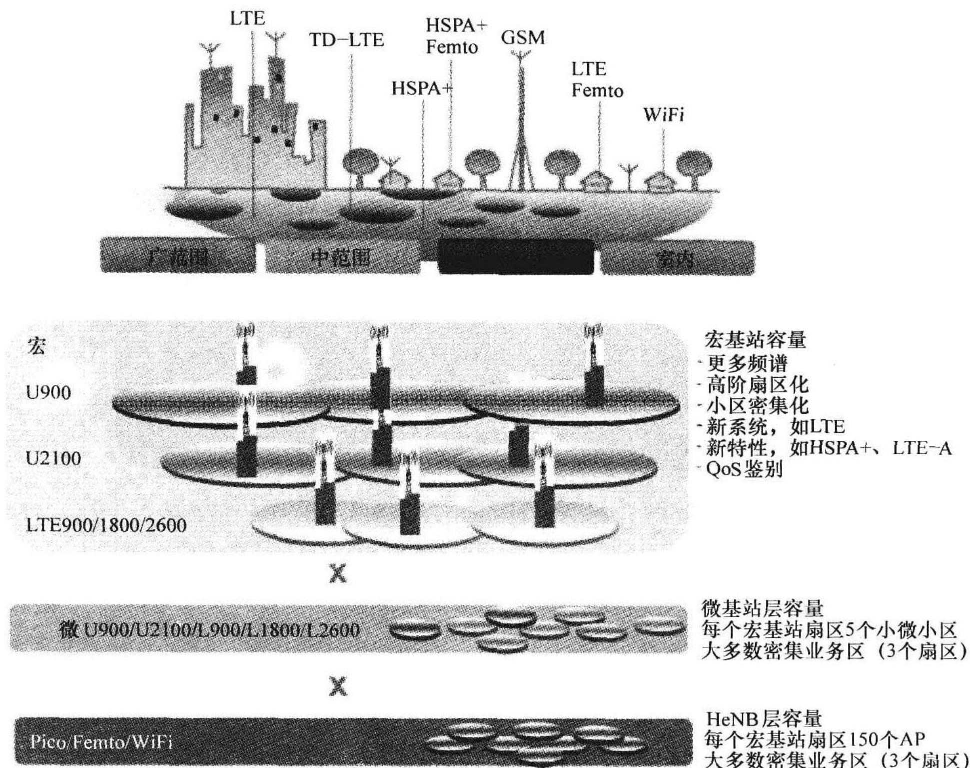


图 1.4 异构网络

进过程进行阐述。

1.2 从传统网络运维到 SON

SON 的理念对网络运营商来说无疑极具吸引力，但另一方面，将 SON 功能集成到现有 OAM 工具中则需谨慎。因此，下面将对传统网络的部署和运营基础进行介绍，讨论自动化的潜在可能性，这也正是 SON 的目标所在。

商业目标一般需要分解为最佳的网络架构部署以及每个网元每个独立参数的优化设置，因此运营商通常采用分层工具集。如图 1.5 所示，左侧为工具类的描述，右侧为运营商组织结构的相应部门、时间计划以及算法与参数的分类。

业务量预测、容量规划和站址规划将上述商业目标转化为合适的网元部署方案，考虑了可用资金、站点/传输链路以及成本开销等约束条件。这些规划以年为时间单位制定，并可以按月细化，规划范围通常覆盖整个网络。由于相关工具、算法和参数均不依赖特定的网元供应商，因此具有通用性以及时间稳定性。

无线、传输和链路的规划及优化过程是对网络不同区域的周期性优化。所用工具

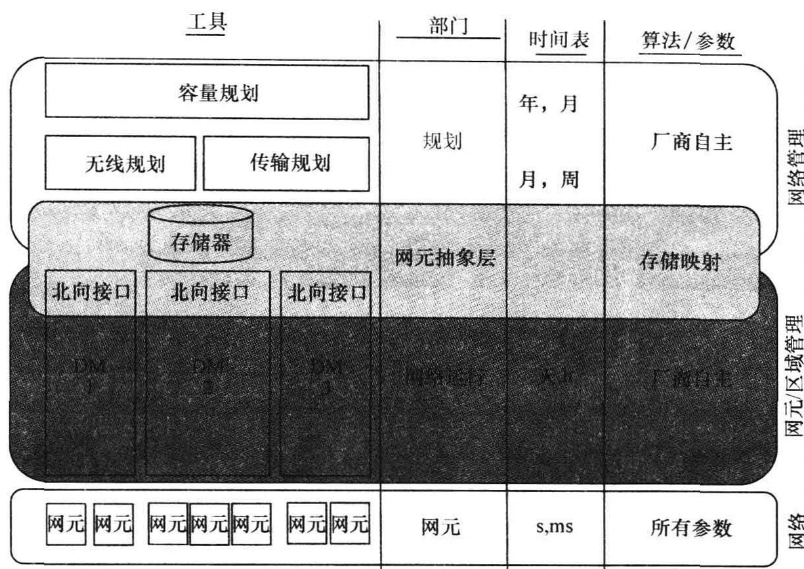


图 1.5 OAM 分层工具链模型

主要用来评估性能、运行仿真以及提供例如优化参数集合或网络优化部署计划的结果输出。规划的时间跨度通常从几个月到几天不等，涉及范围可为整网、网络中的大区域或某些特定的无线接入技术。规划和优化使用独立于供应商的通用算法来进行仿真，比如波传播的仿真。这些算法通常对标准化参数进行操作。由于算法和参数均独立于供应商对网元的实现方式，因此只要一项无线接入技术呼叫过程处理原则不发生变化，这些算法和工具依然可以稳定运行。

许多运营商都对网络规划部门和现网运维部门有着严格区分。规划部门使用的网络或业务管理工具往往与厂商无关，而网络运维部门主要使用的工具即网元管理（Element Managers，EM）和区域管理（Domain Managers，DM）为厂商特有，这两个部门之间的接口通常通过网元抽象层来建立。

一方面，网元抽象层作为中央存储库，用来收集、存储和分发网络中的全部参数，包括所有的标准化参数以及多技术跨厂商的整网中，部分或全部的厂商专有参数。通常情况下，网元抽象层无法理解厂商特定参数的语义，因此无法检查厂商特定参数的正确性，也无法对其进行优化。然而此存储库可用于在网络规划部门（或更普遍的网管相关部门）和网络运维部门之间进行网络参数的协同传输。根据 3GPP SA5 定义的 OAM 参考架构，此存储库功能被视为网络管理（Network Management，NM）层。

另一方面，网元抽象层还用于实现网元所用的厂商特定标示和网管功能所用的通用信息模型标准化参数的映射。网元的每一次版本更新都很可能引起这种厂商特定数据和通用数据之间映射关系的修订，新的功能（如在规划工具中）的引入也需要实现向新增参数的映射，因此这些映射关系的维护代价通常较高。

在多技术跨厂商的网络中，SON 网管工具作为故障管理（Fault Management，FM）和性能管理（Performance Management，PM）的网元抽象层，负责收集告警信息和性能数据。他们从各厂商的 DM 收集数据，并为更高层的通用工具提供抽象视图。

从 3GPP OAM 参考架构来看，上述映射是 DM 的一部分，其中所谓的“北向接口（Itf－N）”对外隐藏了从 NM 层的映射关系。网元抽象层工具通常通过（如 3GPP 或 TMF 的）标准化接口与厂商特定网络或区域管理系统（Domain Management Systems，DMS）进行数据交换。除了告警信息和性能数据的自动采集，这些接口已经允许自动交换配置管理（Configuration Management，CM）数据，并在一定程度上通过网元抽象工具对 DMS 和网元进行远程控制。然而现实中的 CM 数据映射往往不是通过 DM 执行的，而是由综合了映射和资源库功能的专有工具予以实现，然后通过专有接口与 DM 和 EM 进行通信。

在上面对 SON 的介绍中，值得强调的是，网元抽象层不仅对信息模型进行转换，通常还对部门之间以及运维的不同时间尺度之间定义了严格边界。由于 SON 的周期可能超越这两个严格界限，因此 SON 的引入不仅带来技术挑战，还可能会影响整个组织运作流程。

特定厂商的网元管理系统（Element Management System，EMS）和 DMS 能够处理大多数厂商专用参数、检查其正确性，并在一定程度上进行优化，其操作的时间尺度从天到小时不等。这些网络工具在空间上通常覆盖较大区域内厂商的无线网络（或单一的射频技术），无疑这些工具必须要支持网元的每个版本更新。

进行站点的现场调试、网元安装需要用到本地操作/维护终端、站点管理系统等工具。这些工具能够对最底层的硬件和电路板配置进行操作，但通常不具备对高层网络管理系统（Network Management Systems，NMS）的标准接口。这些工具虽然能处理网元的所有数据，但通常不提供任何类型的优化功能。这些工具大多时间只针对某些特定类型的网元，因此现场工程师通常需要应付众多的此类终端，而本地操作终端通常一次只连接到一个网元。

网元通常处于被管理地位，无任何自主管理能力。其实在网元部分已实现了一些“低层次”的排障和优化功能。例如，3G UTRAN 中采用了层级优化：无线网规部门通过 DM 向无线网络控制器（Radio Network Controller，RNC）提供 UTRAN 小区的质量值［如误块率（Block Error Rate，BLER)］，比如每月一次。基于此，RNC 使用私有算法来计算其控制的（外环功控，帧长为 10～100ms）每个承载连接的“信号干扰加噪声比”（Signal to Interference plus Noise Ratio，SINR）的优化目标值并发送给 WCDMA 基站（NodeB)。接着，基站以外环功控的目标 SINR 值作为内环功控的边界条件，以每 666 ms 一次的频率调整各个连接的实际发射功率。这个例子显示了也应纳入网管的无线资源管理（Radio Resource Management，RRM）的自动化程度。

1.2.1 网络自部署

为了最大限度地利用投资资本，基站的数量和位置都必须详细规划，覆盖、容量和质量也必须同时满足商业目标及监管规则。网络的优化部署不仅受空中接口特性和

可用频谱利用率的驱动，也取决于相应回传链路和业务流路由到核心网汇聚网络。另外，还必须考虑到长期的商业流程，如站址获取（场地租赁）以及所有必要的建设和供电等站点准备工作。此外，每一步结果都必须记录在案，如分包商和簿记/库存的支付情况。基站的安装和调试以及服务注册只是整个商业流程中很小的一步，这种商业流程的适当自动化是对整个网络部署工程管理的有力支撑。

每个商业流程的各个步骤都是自身一个流程（或“工作流”）。图 1.6 显示了商业流程和嵌入网管式工作流的区别，本书将聚焦于网络管理域的流程自动化以及网元的自管理。除了对区域管理和网管的北向接口描述，本书将不涉及企业架构和商业流程的整合。

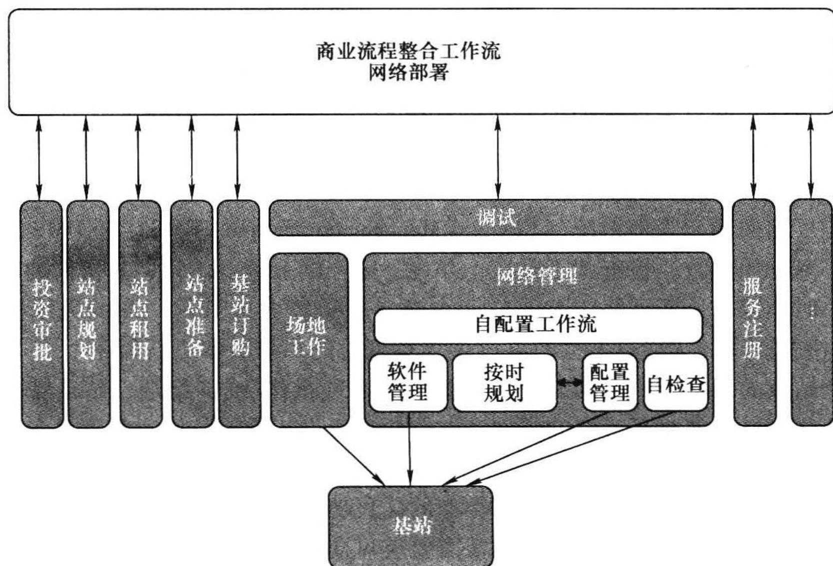


图 1.6　基站安装调试工作流

要部署一个基站，意味着要规划相应的参数，并对基站进行物理安装和逻辑软件配置（调试）。

安装和调试对驻场工程师有不同的技能要求，因此通常至少需要两次站点检查。此外，调试工程师还需要与规划人员进行沟通，为基站配备合适的软件以及数据配置。大多情况下，自动化（包括自动规划或应需规划）可以跳过调试工程师的站点检查，从而实现更少错误、更少劳力、更少代价的基站快速部署。第 4 章将对自配置的概念进行详细讨论。

1.2.2　网络自优化和自排障

运营商需要最大化收益，这是作为企业的最终关键性能指标（Key Performance Indicator，KPI）。然而，收益不仅依赖于网络本身，还依赖于市场、销售等其他因素，换言之，有吸引力的产品还需具备价格优势、广告宣传以及良好的客户关系管理。如

果没有其他方面的因素支撑，即使是最好的网络也无济于事；反之，单独依靠最好的市场和销售也不会产生满意的客户。

定性来说，网络的整体性能可视作“超KPI”：

$$P = x \cdot \text{“覆盖”} + y \cdot \text{“容量”} + z \cdot \text{“质量”} \tag{1.1}$$

式中 权重x、y和z——决于运营商的商业目标、具体区域位置、网络成熟度以及一天中的时刻等。

下面将对整体性能指标逐一进行介绍：

1）覆盖，要求用户能够在任何地方使用移动业务。覆盖问题至关重要，如可避免漫游用户的流失，因此即便在业务稀疏的地方也应重视。

2）容量，是网络承载业务的能力。需要引起注意的是，只有业务才能转换成收益，容量不可。容量不足意味着业务的流失以及收益的损失，而同时，向没有需求的区域提供容量也是一种投资浪费。

3）尽管质量不会立即转化为收益，但好的网络质量对吸引新用户和减少客户流失来说依然非常重要，与市场所致效果类似。长期来说，好的质量会吸引客户，因此将对收益产生积极的影响；反之，则会对收益产生负面影响，需要通过广告或者低税率予以补偿。

由于设备和运维的开支有限，初步的粗糙分析已显示存在目标冲突。例如，只从业务的角度来看，在城市地区投资更多容量优于在农村地区填补覆盖漏洞：从城区1000个国外漫游商务旅客身上赚钱，无论如何将易于通过1000个稳定的本地用户获利。但另一方面，这种策略会造成1000个本地用户的网络质量体验过差，被驱使选择竞争对手的网络。另外，迫于法律责任进行覆盖，如通过LTE的高带宽能力对农村地区实施覆盖，也可能与上述策略产生冲突。

任何OAM集中式或网元分布式的（手动或自动的）优化和排障都必须根据运营商的商业战略进行网络性能的整体优化。此处，优化是指由增加现有投资收益的需求出发，将性能工作点从P1改变到P2（P2 > P1）的操作。本书第5章将介绍一系列用例以及“自优化”解决方案。故障排查也是类似的操作，只是其触发来自系统的故障处理。相对于之前网络无误运行时的“正常”工作点P2，此时运行在性能较差的工作点P1（P2 > P1）。第6章将介绍自动故障排查，也称“自愈”。

如果需要通过不同功能对相冲突的目标进行优化，应该通过功能协同使整体性能得到最大程度的优化。一种“超KPI”会达到个别功能的局部最优结果，而可能与全局最优结果相去甚远，因此，必须进行整体优化，但这也可能导致“乒乓效应”以及其他不期望的影响。第9章将详细讨论这样的协调机制。

1.2.3 SON的特性及其挑战

自组织是一个自发增加系统组织（约束，冗余）的过程，也就是说，这种增加不受环境或周边或其他外部系统的控制（Heylighen，2009年）。一方面，LTE中的SON源于以上用于哲学、物理学、生物学等的通用定义；另一方面，SON的原理也已经在一定程度上应用于IT（自主计算）和通用网络（ad hoc网络）领域。对组网

来说，LTE SON 的显著特点为自组织技术在基础网络中的应用，考虑网络和 OAM 系统（见3.3节）的固有复杂性，这一应用必然是有益的。

由于SON的功能是嵌入到OAM系统及网元自身中，因此SON的架构一直是一个重要且颇有争议的议题，这除了与3GPP原有OAM架构（见3.4节）有较强联系以外，还与分布式、集中式系统架构的整体权衡密切相关。SON的主要驱动力是降低运营成本（而非像通过新业务引入一样增加收益），因此首要的是了解SON的用例所可能产生的商业价值。最后，向SON的过渡过程也面临一定的技术挑战，主要由于从“线下”的规划和优化工具链转变为嵌入OAM系统和网元的“在线”SON功能。此外，即使这些技术挑战已成功解决，SON的功能也需要与相应的现有运营流程及人实施过程相整合（运维人员在高层与系统进行交互、制定SON的策略和目标，而非3.6节所述配置参数的直接改变）。

参 考 文 献

Heylighen, F. (2009) Self-Organisation, Principia Cybernetica Web http://pespmc1.vub.ac.be/selforg.html. [accessed 30 June 2011].

Holma, H. and Toskala, A. (eds) (2011) *LTE for UMTS: Evolution to LTE-Advanced, Revised Edition*, John Wiley & Sons, Chichester, Chapter on SON.

Laiho, J., Wacker, A. and Novosad, T. (2006) *Radio Network Planning and Optimisation for UMTS*, 2nd edn, John Wiley & Sons, Inc., New York.

NGMN (2008) Use Cases related to Self-Organising Network, Overall Description, NGMN Technical Working Group, *Self-Organising Networks*, (ed. F. Lehser), December 2008.

第2章　LTE 概述

Cinzia Sartori, Anssi Juppi, Henning Sanneck, Seppo Hämäläinen 和 Miikka Poikselkä

LTE 系统在进一步提高终端用户吞吐率、提升小区容量、降低用户面时延方面提出了一系列较为先进的需求。这些需求结合全移动性，将会为用户体验带来巨大的好处。

LTE 支持各种 IP 数据流。IP 电话（Voice over IP，VoIP）可以更好地实现与多媒体服务相结合。LTE 先进的需求促进了新型网络架构概念的诞生，即演进分组系统（Evolved Packet System，EPS）。EPS 由增强型通用陆地无线接入网络（E-UTRAN 或 LTE）和演进分组核心网（Evolved Packet Core，EPC）构成。分组交换网络同时支持数据和语音服务。3GPP R8 版本定义了 E-UTRAN 和 EPC 并在后续 3GPPP 版本中增强。

LTE 提供了一种新的标准化方法。R8 版本同时对 LTE 网络和 OAM 系统进行标准化，为设计一种带有内置 SON 功能的整体优化系统提供了巨大的机会。

本章首先给出简短介绍，并没有深入到 EPS 网络架构的技术细节，包括 E-UTRAN 和 EPC [在 LTE 专业技术书籍中深入说明，例如（Holma 和 Toskala，2011 年）针对 LTE 无线接入网络]。然后，本章将对 LTE-Advanced 作简要描述（3GPP R10 版本中描述 LTE-A），本章其余部分侧重于 LTE 无线接入网络场景、LTE 演进以及潜在的 SON 功能。

2.1　LTE 和 SAE 的介绍

LTE 是能对 UMTS 系统进行扩展和修改的 3GPP 项目，目标是构建出高速率、低延时、分组优化的无线接入系统。由 3GPP 提出的系统架构演进（System Architecture Evolution，SAE）提供了 3GPP 核心网的演进方案。新型空中接口和网络架构的目标是降低每传输比特的开销，通过以下方式来实现：

1）先进的调制技术以实现无线频率的最优利用。

2）扁平化架构以实现网元数目的最小化和传输网络的最优化利用。

3）处理高质量、低延迟、实时业务的能力，在单一全 IP 网络上实现语音服务和数据服务。

本章将对 3GPP、LTE 的需求和规范进行概述。

2.1.1　3GPP 结构、进展和 LTE 规范

第三代合作伙伴计划（the 3rd Generation Partnership Project，3GPP）制定了 LTE

标准、WCDMA 及 GSM 演进的最新阶段。3GPP 是一种立足于合作标准化模式、统一电信标准的组织。它是由欧洲电信标准化协会（European Telecommunications Standards Institute，ETSI）发起成立的，该组织定义了成功的 GSM 标准，和其他大洲的同行结成全球合作伙伴关系，目前已经包含了全球300多个成员。

3GPP 标准化涉及了 2G GSM 和 3G WCDMA 无线技术以及 4G LTE 技术的标准化工作。此外，3GPP 也涉及业务和系统层面以及核心网的标准化。为了处理如此庞大的工作范围，3GPP 定义了一些结构化工作流程；每个技术规范组（Technical Specification Group，TSG）被进一步划分为工作组（Working Groups，WG），如 TAN TSG 可分为与 RAN 无线层、无线 L2 和 L3、无线性能和协议方面以及移动终端一致性测试相关的工作组，如图 2.1 所示。

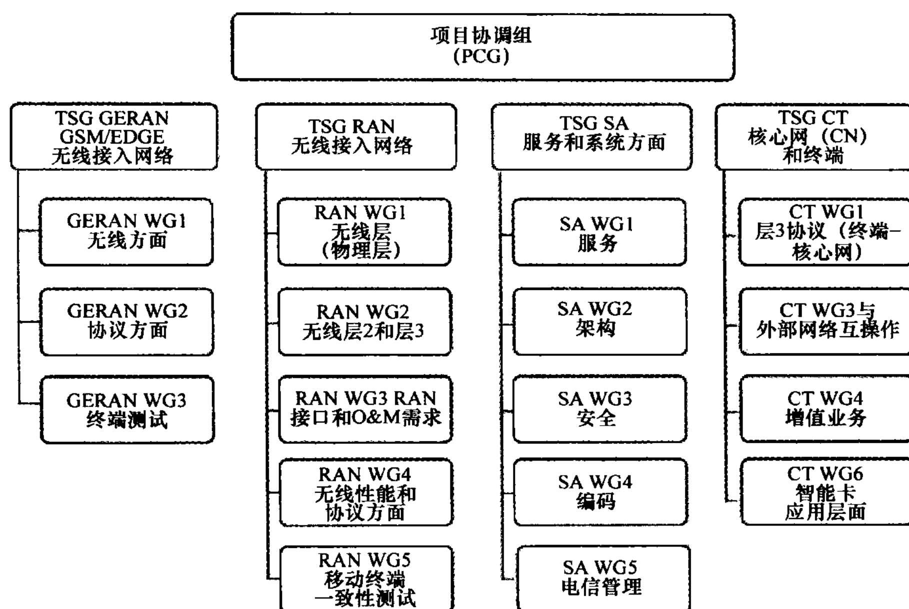


图 2.1 3GPP 网络结构（经 3GPP 准许转载）

LTE 需求于 2005 年上半年制定，并已经成为 LTE 研究项目（Study Item，SI）的基础。3GPP 的 SI 是指在 WI（Work Item，工作项目）阶段之前，为大规模商用作准备的可行性研究。LTE SI 关注点在于依据满足 LTE 需求的多址接入技术和系统架构定义新型 LTE 无线接入技术。LTE 研究项目于 2006 年 9 月正式结束，接着启动 LTE 工作项目。首批 LTE 规范已成为 3GPP R8 版本中的一部分内容。

R9 版本和 R10 版本对 LTE 进行了增强。最新的 R10 版本定义了有关 LTE - Advanced 的关键技术，这些技术可以显著地改善用户数据速率，扩大覆盖范围，并同时减少延时。将在 2.1.8 节对 LTE - Advanced 进行介绍。3GPP 的演进路线如图 2.2 所示。

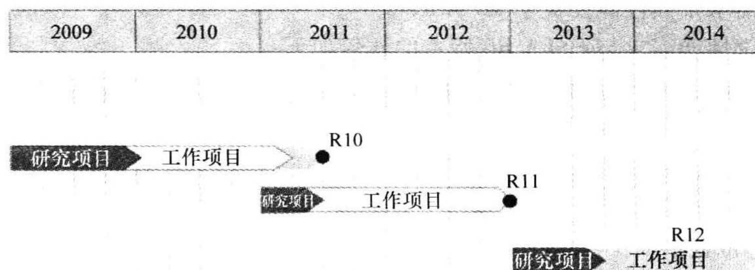


图 2.2　3GPP 演进路线

工作项目的成果是输出一种描述标准技术的技术规范。技术规范按类别分组，每种类别关注于特定的技术领域。E－UTRAN 规范已经在 R8、R9 和 R10 版本的 36 系列发布，并且被划分为下列 6 个子类别：

1）36.100 系列包含无线规范和演进型基站（evolved Node B，eNB）的一致性测试。

2）36.200 系列包含层 1（物理层）规范。

3）36.300 系列包含层 2 和层 3 空中接口信令规范。

4）36.400 系列包含网络信令规范。

5）36.500 系列包含用户设备一致性测试。

6）36.800 系列和 36.900 系列，即包含背景信息的技术报告。

SAE 规范被分散到许多不同的规范中。下列文档包含 SAE 的高层架构：

1）23.401 针对 E－UTRAN 接入的 GPRS 增强。

2）23.402 针对非 3GPP 接入的架构增强。

LTE 电信管理相关规范：

1）32.100 系列包含管理准则、架构和需求、故障管理集成参考点（Integration Reference Point，IRP）。

2）32.200 系列包含资费管理。

3）32.300 系列：通用管理 IRP。

4）32.400 系列：性能和跟踪管理 IRP。

5）32.500 系统：自组织网络 IRP。

6）32.600 系列：配置管理 IRP。

LTE 和 SAE 规范的最新版本可通过 3GPP 网站获取 http：//www.3gpp.org/ftp/specs。

2.1.2　LTE 需求

LTE，3GPP 无线接入技术的长期演进，是 3GPP 创建的一个“研究项目”，其目标是确保其在未来 10 年的竞争力。LTE 需求在 3GPP TR25.913（2009）中进行描述。

LTE 的关键需求是其性能要优于 3G HSPA。

LTE 关键性能需求与 HSPA R6 版本的比较如下：

1）负载网络的下行频谱效率（bit/s/Hz/site）为 HSDPA R6 版本的 4~6 倍，上行频谱效率为 HSUPA R6 版本的 2~3 倍。

2）LTE 系统在 20MHz 带宽内的上、下行峰值数据速率分别为 100Mbit/s 和 50Mbit/s。峰值数据速率应该与带宽的大小呈线性关系。

3）频率带宽在 1.5~20MHz 之间灵活分配。

4）往返时间 <10ms。

5）分组交换优化。

6）无缝移动性.

表 2.1 概述了 LTE 主要需求。

表 2.1 LTE 主要需求 3GPP TR25.913（2009，经 3GPP 准许转载）

指 标	需 求	条 件
系统		
往返时间	<10ms	
连接建立时延	<100ms	空闲态到激活态
运行带宽	1.4~20MHz	
覆盖（小区大小）	5~100km	超过 30km 稍有降低
移动性支持	最高达到 500km/h，而在低速率 0~15km/h 之间是最优的	
下行		
峰值频谱效率	>5bit/s/Hz	LTE 以 FDD 模式运行在 20MHz 带宽
峰值传输速率	>100Mbit/s	2×2 空时复用
小区边缘频谱效率	>0.04~0.06 bit/s/Hz/用户	2×2 空时复用，干扰抑制接收机（Interference Rejection Combining receiver，IRC）每小区 10 个用户（高负荷）
上行		
峰值频谱效率	>2.5bit/s/Hz	LTE 以 FDD 模式运行在 20MHz 带宽
峰值传输速率	>50Mbit/s	单天线传输模式
小区边缘频谱效率	>0.02~0.03 bit/s/Hz/用户	单天线传输，干扰抑制接收机（Interference Rejection Combining receiver，IRC）每小区 10 个用户（高负荷）

2.1.3 系统架构概述

如引言所述，3GPP 为 LTE 定义了一种新的系统架构。EPS 由增强型通用陆地无线接入网络（Evolved UTRAN，E-UTRAN）和演进分组核心网（Evolved Packet

Core, EPC) 构成。UE 可通过 3GPP 和非 3GPP 接入 EPC。通常而言，运营商选择基于 3GPP 接入的 EPS 方案的目的是将其作为到现有 2G/3G 架构的平滑演进。运营商选择基于非 3GPP 接入的 EPS 方案的目的是最大化通用部署非 3GPP 协议以及最小化 3GPP 特定协议的发展。EPS 的系统架构如图 2.3 所示，图中描述了基本 E－UTRAN 结构的相关逻辑组件及它们之间的接口。除了这种基本配置以外，3GPP TS23.402 (2011) 详细描述了多种架构参考模式。

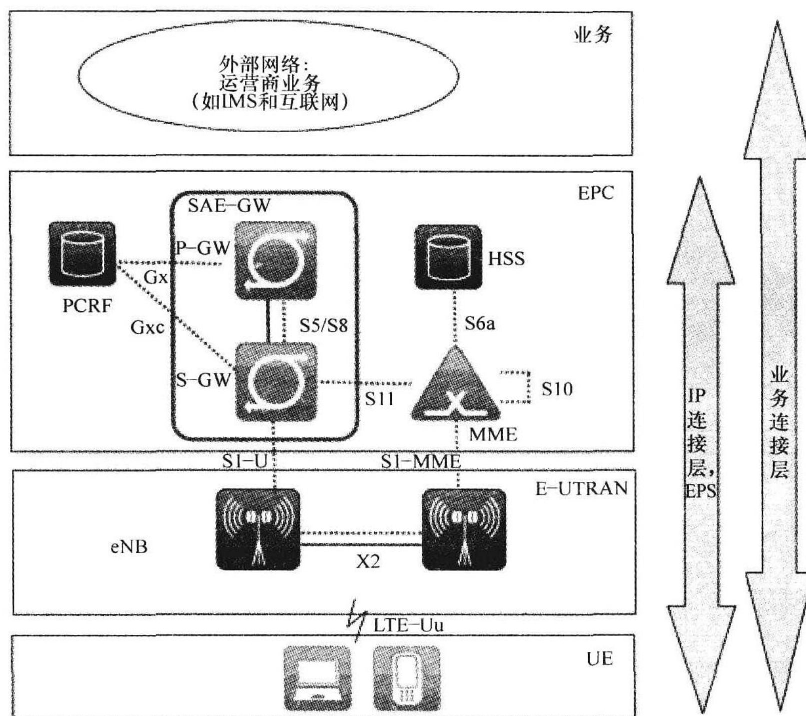


图 2.3 EPS 系统架构（Holma 和 Toskala，2011 年，经 John Wiley & Sons. Ltd 准许转载）

EPS 架构中，只有无线接入网和核心网是新的，而业务连接层即 UE 和业务保持不变，其功能与其他 3GPP 系统的功能一致。

EPS 为保证 IP 连接性，按照网元高度优化的方式提供 IP 连接层和协议层。EPS 中的一个 EPS 承载是指 UE 与分组数据网关之间满足一定服务质量（Quality of Service, QoS）的 IP 流，反之亦然。若与 3G 网络相比，EPS 目标之一可以简单地说成是保证 QoS。

EPS 架构从以下三个关键点反映出 LTE/EPC 的性能需求：

1）与 GPRS/UMTS 相比，数据路径上的网元数量减少。

2）通过单一节点精简了 RAN 功能。

3）控制面网元和用户面网元的分离（MME 和 S－GW）

EPS 系统采用扁平化网络架构，与 EDGE 和 WCDMA 相比，网络架构有两大改

变。在 LTE 接入网络中，所有无线功能都集中到无线侧惟一网元 eNB 上，而不再使用控制器，如 WCDMA 网络中的 RNC 和 GERAN 网络中的 BSC。除此以外，EPC 核心网不包含电路交换域。

2.1.4　演进的 UTRAN

LTE 的下行无线传输基于正交频分复用（OFDM），数据承载在窄带子载波上。信号由多个子帧组成，每个子帧长度为 1ms，如图 2.4 所示。短帧以及扁平化网络结构能够实现数据和信令传输过程中的较短时延。

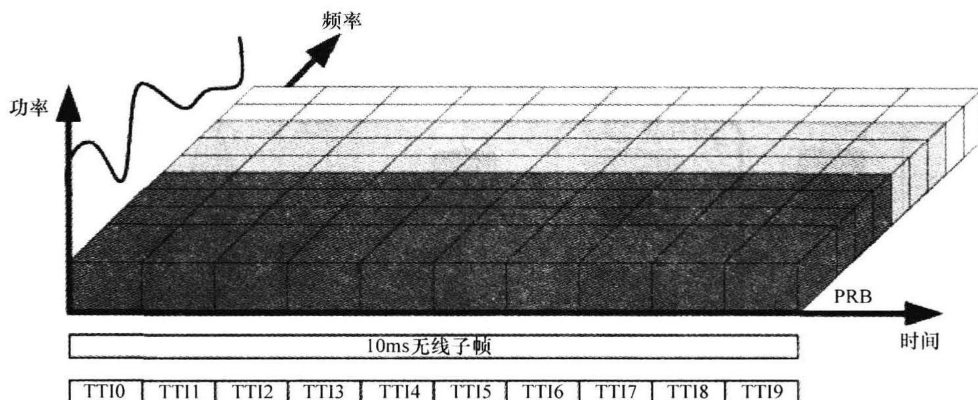


图 2.4　LTE 系统的时域和频域资源

对于上行链路，尽可能地限制 UE 发送端功率损耗的需求导致使用单一载波 FDMA。

LTE 的系统带宽是可扩展的，范围在 1.4～20MHz 范围之间，并且允许成对频谱（下行和上行使用不同频带）和不成对频谱（下行和上行使用相同频带）。可使用频分双工（Frequency Division Multiplexing，FDD）和时分双工（Time Division Multiplexing，TDD）两者共享同一下行子帧结构。

LTE 中引入多天线技术。所有的 UE 支持至少两个下行接收分集的天线。LTE 还支持更先进的技术，例如发射分集、空分复用（单用户 MIMO 和多用户 MIMO）以及波束赋形。

LTE 峰值数据速率相比 HSPA + 增长达 100%。频谱效率也有明显的增长，然而在覆盖范围上没有实质性的改善。在带宽为 20MHz 时，基于 FDD 系统的 LTE 性能和 HSPA + 性能的比较见表 2.2。

2.1.5　E－UTRAN 的功能网元

E－UTRAN 仅包括一个节点，即 eNB（eNodeB）。eNB 与 UE 通过空中接口进行连接。E－UTRAN 无线接入网络仅由 eNB 组成网状网络，其中 eNB 与相邻 eNB 之间通过 X2 接口相连（见图 2.5）。

表 2.2　LTE 以 FDD 模式工作在 20MHz 带宽下的性能

（3GPP TR25.913，2009，经 3GPP 同意允许转载）

需求	LTE	HSPA +
峰值传输速率	DL：150～300Mbit/s	DL：42～168Mbit/s
带宽 20MHz	UL：75Mbit/s	UL：11～54Mbit/s
频谱效率（平均）4 发送终端	1.7～2.7 bit/s/Hz/小区	1.21～1.9 bit/s/Hz/小区
覆盖（链路预算）	162dB	162dB

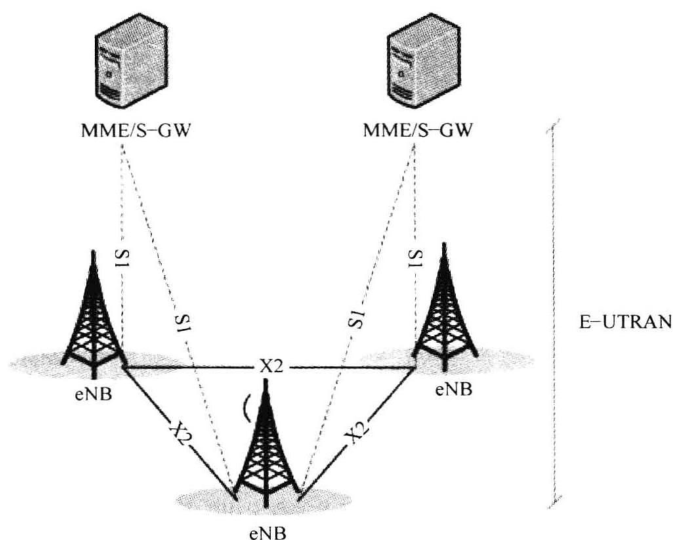


图 2.5　E－UTRAN 整体架构（3GPP TS 36.300（2011），经 3GPP 准许转载）

所有的无线功能都集中到 eNB，这就意味着 eNB 是所有无线相关协议的终点。包括物理（PHY）层、媒质接入控制（Medium Access Control，MAC）层和分组数据控制协议（Packet Data Control Protocol ，PDCP）层，其中 PDCP 层包括用户平面头压缩和加密。

控制平面包括无线资源控制（Radio Resource Control ，RRC）功能，即无线资源管理、接纳控制和基于 QoS 策略的调度。

基本系统架构的控制平面和用户平面如图 2.6 所示。

2.1.6　演进的分组核心网

演进分组核心网 EPC 针对 IP 连接性进行了优化，并且不支持电路交换域。EPC 包括下列逻辑网元以控制 EPC 承载和 UE：移动管理实体（MME）、服务网关（Serving Gateway，S－GW）和分组数据网络网关（Packet Data Network Gateway，P－GW）。

MME 扮演 GPRS 网络中 SGSN 的角色。MME 是一种控制平面元素，允许用户平

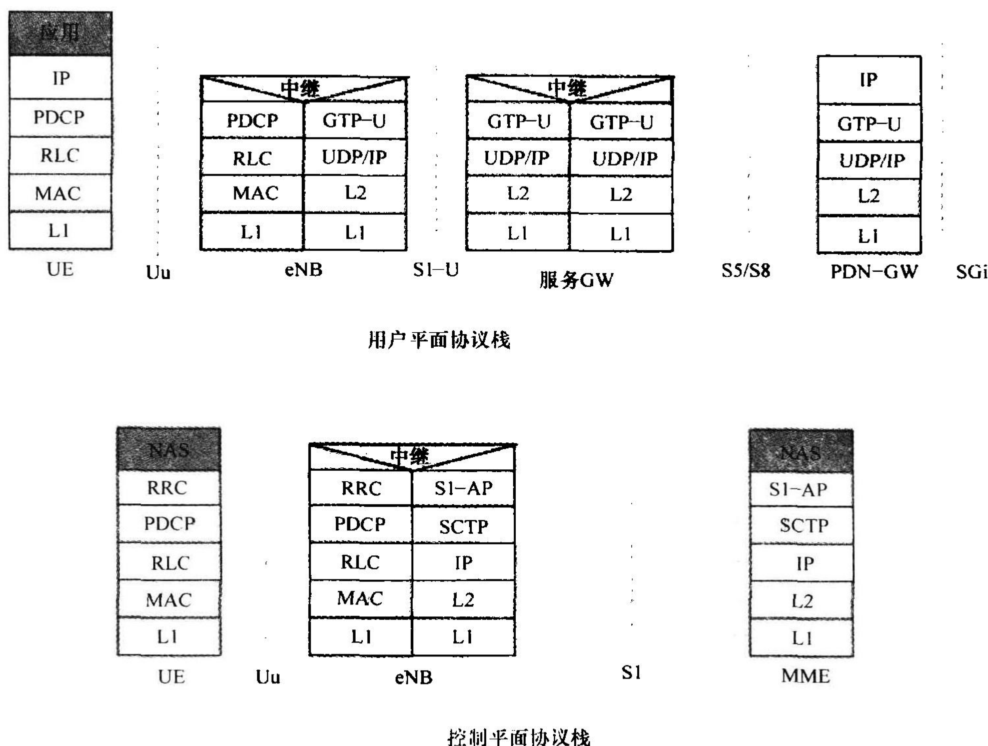


图 2.6 基本系统架构的用户平面和控制平面
（3GPP TS 36.300（2011），经 3GPP 准许转载）

面流通过直接隧道绕过 MME。

GGSN 具有为运营商服务网络和 Internet 提供连接性的功能。在 EPC 中，有两个网关元素来承担 GGSN 的功能；S－GW 是到 E－UTRAN 的用户面（User plane，U－plane）网关，P－GW 是到分组数据网络的用户平面网关［如 Internet 或运营商 IP 多媒体子系统（IP Multimedia Subsystem，IMS）］。S－GW 和 P－GW 可以部署在一起或分开部署，若 S－GW 和 P－GW 部署在一起，则称为 SAE－GW 网关。

EPC 的目标之一是实现与其他 3GPP 接入网络和其他无线接入网络之间的最优互操作。

2.1.6.1 演进分组核心网功能网元

演进分组核心网的功能模块如图 2.7 所示。

涉及 EPS 承载的建立和整体 UE 控制的 EPC 网元包括 MME、S－GW 和 P－GW。

对于用户的签约数据（包括永久的和基于位置的），以及用户策略和计费控制，在 EPC 中由以下网元负责：

1）归属用户服务器（HSS）。

2）策略和计费资源功能（PCRF）。

E－UTRAN 和 EPC 的功能划分如图 2.7 所示。

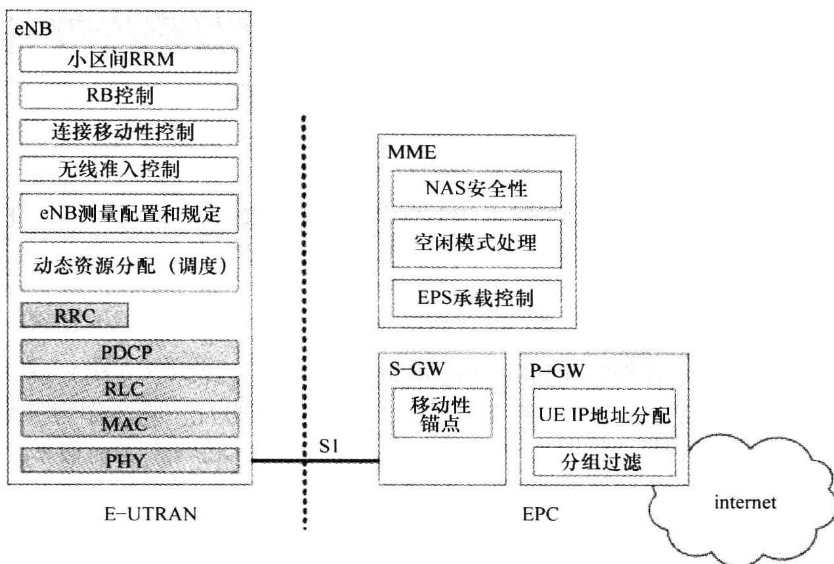


图 2.7　E-UTRAN 和 EPC 的功能划分（3GPP TS 36.300（2011），经 3GPP 准许转载）

2.1.6.2　移动性管理实体

MME 是 EPC 的核心网元，它提供了 EPC 与 UE 之间的控制面逻辑连接（称为非接入子层或者 NAS 信令）。MME 负责管理和存储 UE 上下文，建立并分配临时 UE 身份标识、用户鉴权、移动性管理及承载管理，并且是 NAS 信令的终结点。MME 负责如下过程：

1. 移动性管理过程

1）空闲态和激活态的用户服务区跟踪和寻呼过程。

2）MME 根据 UE 活动的变化来控制无线资源的建立和释放，同时还参与切换信令。

2. 鉴权和安全

1）MME 通过与 HSS 的交互来确认 UE 的鉴权密钥，它为每个 UE 分配一个临时 ID，即全局惟一临时标识（Globally Unique Temporary Identity，GUTI）以保证用户的隐私，这样可以使得通过空中接口发送永久用户 ID（即 IMSI）的需求最小化。

2）通过 SGSN 之间的接口 S3，对 2G-3G 与 LTE 接入网络之间的移动性信令进行合法监听。

3）提供控制平面功能。

3. 订阅信息和业务连续性的管理

MME 从归属网络获取 UE 的订阅信息，从而确定 UE 在网络附着时所连接的分组数据网（Packet Data Network，PDN）。

2.1.6.3　服务网关

S-GW 是连接 E-UTRAN 的用户面网关。S-GW 的主要功能是作为用户平面隧

道，即所有的用户平面分组都要通过该隧道传送。S－GW 作为当用户移经 LTE 小区，以及用户进行 eNB 间切换时的锚点，也作为 LTE P－GW 和其他 3GPP 技术之间移动性的锚点，即 LTE 与 2G/3G 系统切换的锚点。该锚点是所有 3GPP 接入技术包括 2G、3G 和 LTE 的公共节点。不管 UE 采用何种 3GPP 无线接入技术，或者由于切换导致 UE 的无线接入技术发生改变，都能实现用户数据的路由。

S－GW 也负责数据包转发、路由和下行空闲态 UE 数据的缓存。另外，它是空闲态 UE 的下行数据路径的终结点，当下行数据到达 UE 时它负责触发寻呼流程，S－GW 还负责对用户的业务数据进行合法监听。

2.1.6.4　分组数据网关

P－GW 是连接外部 PDN（如 Internet 或运营商的 IP 多媒体子系统）网络的用户面网关。P－GW 负责策略执行、计费支持和用户 IP 地址分配。它还作为一个全局移动性锚点，来实现 3GPP 与非 3GPP 接入，以及 LTE 和 3GPP R8 之前版本之间的移动性。

P－GW 是 EPS 和外部 PDN 网络的边际路由器。典型地，P－GW 为 UE 分配 IP 地址，还具有策略控制实施功能（Policy Control Enforcement Function，PCEF），即对用户数据包括计费信息报告的调节、开启和过滤功能。一部 UE 可能会同时接入到许多外部网络。

2.1.6.5　LTE/EPC 相关的传统网元

与 EPS 进行互操作的传统网元（见图 2.8）如下：

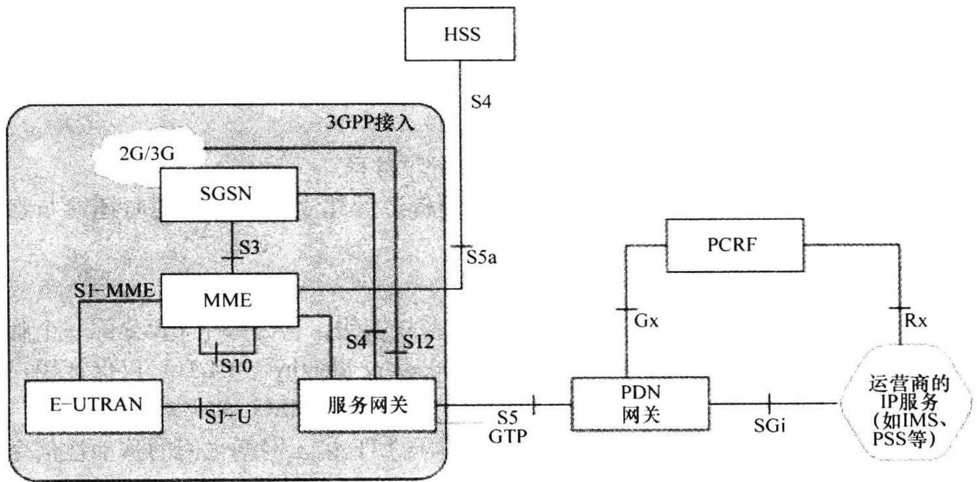


图 2.8　3GPP（2G/3G/LTE）通过基于 S5 接口的 GTP 接入到 EPS 非漫游参考架构（经 3GPP 准许转载）

1）服务 GPRS 支持节点（SGSN）；

2）归属用户服务器（HSS）；

3）策略和计费资源功能（PCRF）；

4）鉴权、授权与计费功能（AAA）。

SGSN 负责核心网和传统 2G/3G 之间分组数据包的传送。对于 EPS 来说，该节点仅在系统间移动性管理功能上发挥作用。

HSS 是核心网实体，它负责管理用户信息，并且执行用户的鉴权和认证。由 HSS 管理的用户信息包括：用户的签约和安全信息以及用户具体的物理分配信息。HSS 存储用户签约信息，该信息可表明用户可能使用的业务以及用户能够接入的 PDN。此外，它还记录用户最后访问的网络 MME 的位置。

PCRF 负责策略和资费控制，决定如何根据 QoS 信息处理业务，并且为 P - GW 中的 PCEF 提供策略。

AAA 负责传递非 3GPP 接入网络和 EPC 之间的鉴权和认证信息。

2.1.7　LTE 承语音技术（VoLTE）

本章最开始已经说明 EPS 是全 IP 技术，我们得出的结论是语音业务可以以一种新的方式被传送。IP 领域中的语音称为 IP 电话（Voice over IP，VoIP）。支持 VoIP 的 3GPP 标准称为 IP 多媒体子系统（IP Multimedia Subsystem，IMS）。IMS 是一种独立接入且基于标准化 IP 连续性的系统，它利用基于 Internet 的协议（3GPP TS23.228，2011）使多媒体业务的不同类型直接面向终端用户的业务控制架构。基于 IMS 的 VoLTE 解决方案是在语音核心网的中心设置 IMS 来管理签约用户的连续性，负责计费以及执行策略控制。语音业务（补充业务，LTE 与 CS 之间的业务连续性等）是由 IMS 之上的语音应用服务器管理。

除了针对这些业务制定详细的架构以及协议级需求的 3GPP 规范以外，GSM 协会（GSM Association，GSMA）针对语音和 SMS 的 IMS 特点已经发布了更多具体规范，可参见 IR.92 文件（GSMA PRD IR.92，2010）。基于 3GPP 规范，IR.92 包含一系列用以管理语音及 SMS 业务的强制性和优化功能集，涵盖了 LTE UE、LTE 接入网、EPC 核心网和 IMS 子系统功能。从某种意义而言，该技术特性规范为所有行业利益相关者提供了一个较为公平的竞争环境，并在这个平台上提高他们认为合适的 VoLTE 服务。更为重要的是，随着时间的推移，它在整个行业格局允许 VoLTE 业务的基本运营及互操作。

尽管 LTE、IMS 和全 IP 网络的演进路线清晰明了，然而 3GPP 又定义了一种可选方法，即 CS 语音回落（CS - FallBack，CSFB）技术（在 3GPP TS23.272，2011 中定义）。在 CSFB 方案中，无论何时 LTE 中的终端发起或收到语音呼叫，都要自动转移到 2G 或 3G 网络。一旦呼叫完成，终端业务回退到 LTE。这是一种有效的方案，但是当终端被强制切换到 2G/3G 网络时，它需要中断 LTE 的连接。这有可能是一个很大的问题，取决于在语音呼叫之前使用的应用业务。CSFB 方案可以假定为临时 VoLTE 漫游方案。此外，这合乎一些运营商的意愿，即打算提供热点区域 LTE 覆盖以及（/或）希望在一段时间内重新使用传统网络的运营商。

2.1.8　LTE - Advanced 长期演进

展望未来，数据业务将在未来几年内继续呈指数增长，其推动因素是移动宽带业

务的采用，使用强度增加，设备极好的可用性和选择性以及 M2M 通信。

除了以上关键驱动因素，数据分析显示数据业务以一种不均匀的方式分布。这样的现状需要网络具备更高的带宽和更高的效率，这需要结合一些针对特定网络场景的特定方法才能实现。

LTE R8 和 LTE R9 主要是面向传统广域覆盖部署场景进行优化，基于宏基站和双收单发单载波终端，而 LTE - Advance 的目标是应用更复杂的场景。实际上，LTE - Advanced 的重点并不是引入一种新的空中接口技术，而是对 LTE 的技术特征和能力进行扩展，以支持新网络的部署和确保业务的最优化分布。

R10 中定义 LTE - Advanced 是以 ITU - R 中定义的 IMT - Advanced 的需求为目标，并且维持与之前 LTE 版本的后向兼容性。后向兼容性意味着 LTE R8 和 R9 版本的终端在 LTE - Advanced 网络中可以应用，反之亦然。LTE - Advanced 技术增强的方面主要涉及：数据速率的提高、覆盖范围的扩大、时延的减少、与其他技术的互操作以及全球漫游（3GPP TR36.913，2011，Ghosh 等人，2010，Mogensen 等人，2009）。表 2.3 对其作了总结。

表 2.3　LTE - A 需求（3GPP TR36.913（2011），经 3GPP 准许转载）

LTE - A 需求	条　件	
峰值传输速率 带宽（20MHz × 5）	DL：1Gbit/s UL：500Mbit/s	
峰值频谱效率	DL：30bit/s/Hz UL：15bit/s/Hz	基站侧 4 个天线，终端侧 2 个天线
平均频谱效率	DL：2.6bit/s/Hz UL：2.0 bit/s/Hz	
小区边缘频谱效率	DL：0.09bit/s/Hz UL：0.07bit/s/Hz	
时延	用户平面：10ms 控制平面：50ms	

LTE - Advanced 包含以下技术特征，如图 2.9 所示：载波聚合（Carrier Aggregation，CA）技术可以使下行峰值速率到达 1Gbit/s，上行峰值速率达到 500Mbit/s，上行和下行增强 MIMO 的目标是提高频谱效率；中继节点（带内回传）及协同多点发射和接收（Coordinated Multipoint transmission and reception，CoMP，CoMP 不包含在 R10 中）的目的是解决小区边缘的强干扰问题。另外，异构网络中引入了小区层之间优化的互操作（参见 2.1.8.5 节和第 10 章）。

LTE - Advanced 的每个技术特征将在下一节介绍。就 SON 组件而言，在第 4 章中介绍中继自配置和自动邻区关系（Automatic Neighbour Relations，ANR），第 10 章介绍异构网络。

描述 SON 功能的同时，分析了其他 LTE - Advanced 技术特性的实用性。

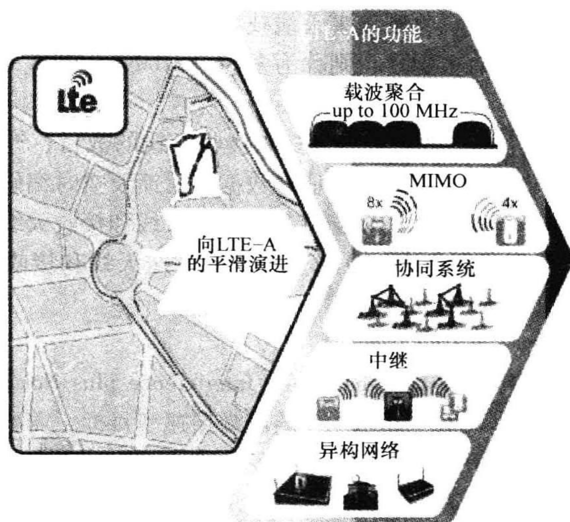


图 2.9　LTE - A 的功能

2.1.8.1　载波聚合

LTE - A 系统通过带宽扩展的方式实现超高峰值数据速率的目标。

CA 技术最多允许将 5 个 LTE R8 分量载波（Component Carriers，CC）进行聚合，以实现最高达 100MHz 的传输带宽（5 × 20MHz），终端用户的下行峰值速率达到 1Gbit/s 以及上行峰值速率达到 500Mbit/s，同时维持后向兼容。分量载波的聚合是基于每用户的，因此小区内的不同用户可以有不同的配置（见图 2.10）。

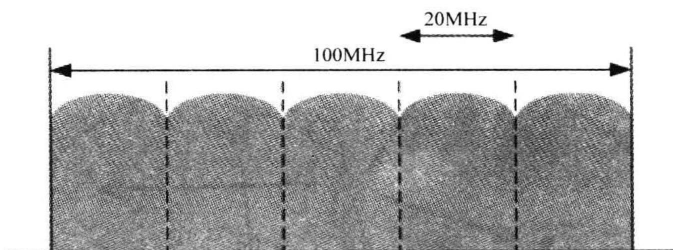


图 2.10　载波聚合

为了使运营商提供较高的吞吐量而无需分配较宽的连续频带，除了单频带连续频谱聚合，3GPP 还定义了另外两种聚合方式，即单频带不连续频谱聚合和多频带不连续频谱聚合。另外，由于只有上行或下行频带，载波聚合允许以 FDD 的方式使用不对称带宽。

2.1.8.2　增强的 MIMO

多天线技术包括空时分集和波束赋形。反射信号在被接收之前沿着多径进行传播会造成相互干扰，针对该问题，天线分集是很有效的解决方法。

如果多径传播针对单用户，则该多天线技术称为单用户 MIMO（Single - User MI-MO，SU - MIMO）；若针对多用户，则称为多用户 MIMO（Multi - User MIMO，MU - MIMO）。

MIMO 性能受到多个参数的影响：发送和接收天线的数目、针对信道估计的参考信号和算法、从接收端到发送端的信道估计数据的反馈及空时编码方法。

R8 和 R9 版本在下行 MIMO 最多支持 4 根发送天线和接收天线，而上行只能支持 1 根天线。R10 版本扩展了下行 MIMO 以支持 8 根发送天线和接收天线，同时上行最多支持 4 根发送天线和 8 根接收天线。

2.1.8.3 中继

为了使小区边缘信干噪比（Signal - to - Interference plus Noise Ratio，SINR）相对较低的用户也可以达到 LTE - Advanced 的高数据速率目标，需要部署紧凑的基础设施（基站间距离缩短）。利用中继节点实现多跳技术是解决该问题的一种有效途径。中继节点的原理是针对小区边缘的用户通过缩短发送端与接收端之间的距离以提高链路预算。

事实上，在小区边缘部署中继节点会增加小区的容量或扩大小区的覆盖范围（见图 2.11）。宿主基站在服务本小区用户的同时，贡献出部分空中接口容量用来为一个或多个中继节点提供回程连接。有两种类型的中继节点，最简单的形式是常见的放大转发（Amplify and Forward，AF）中继，也称为直放站。AF 简单地对来自宿主基站的信号进行放大和转发。然而这个解决方案的缺点是显而易见的，即 AF 中继除了放大有用信号，也会放大干扰和噪声。因此，在噪声和干扰存在的场景下，这种方案不是很有效。

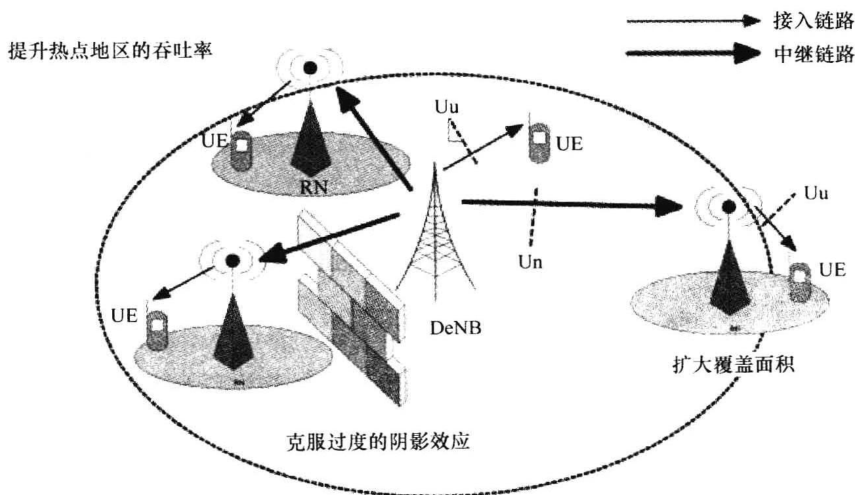


图 2.11 宿主基站和中继节点

另一类型的中继称为解码转发（Decode and Forward，DF）中继，首先对接收的信号进行解码，然后进行重新编码并转发。因此，DF 中继可以应用在干扰和噪声受

限的环境下，并能提高系统容量。

中继节点可以看作异构网络中的一种特殊情况。对于中继节点来说，由宿主基站来提供回程，因此中继节点有一些特殊的配置过程，自动邻区关系（Automatic Neighbours relations，ANR）与其他节点相比稍有不同。第 4 章主要描述中继自配置和 ANR。

2.1.8.4 CoMP

CoMP（Coordinated Multipoint transmission and reception，协作多点发射和接收）在提高小区边缘数据速率和系统容量方面有巨大的潜力。它能够解决小区边缘信号质量差和干扰问题。由于频率复用因子为 1（即为实现小区广覆盖，在系统中对频率信道重复使用），LTE 小区边缘用户性能受限于共信道（小区间）干扰。

尽管研究已经显示 CoMP 对单小区用户速率和容量的提高有巨大的潜力，但是在广域网络部署过程中没有充足的证据显示能够达到这样的效果。

协同多点传输过程需要大量的分散在不同位置的 eNB 之间进行密切协作。基站之间通过彼此间的协作来实现联合调度和传输以及对接收信号的联合处理（见图 2.12），这会导致小区间较高的信令负荷，因此基站内 CoMP（同一个基站下不同扇区之间通信）有可能成为最可行的解决方案。

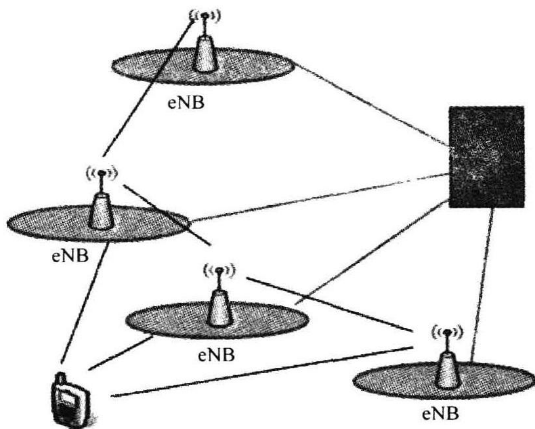


图 2.12　协同多点传输

由于以上原因，CoMP 技术尚未成熟，R10 版本没有完全包含该技术的所有特征。R11 版本将更关注 CoMP 的实际概念和性能增益，其中包括传送技术。

2.1.8.5 异构网络

多层网络拓扑结构可以进一步提高频谱效率。在这种场景下宏小区提供连续广域覆盖，同时微小区（由低功率节点提供服务）可提高热点区域的性能（见图 2.13）。微基站、微微基站或 HeNB 都能为微小区提供服务。

对于微微基站（Pico eNB）这类低功率节点而言，运营商可以通过传统网络规划，以一种可协调方式进行部署。企业级 HeNB 由运营商安装部署，而家庭级 HeNB 则由终端用户安装而无需运营商干涉，因此后者也称为“不可协调的部署方式”。

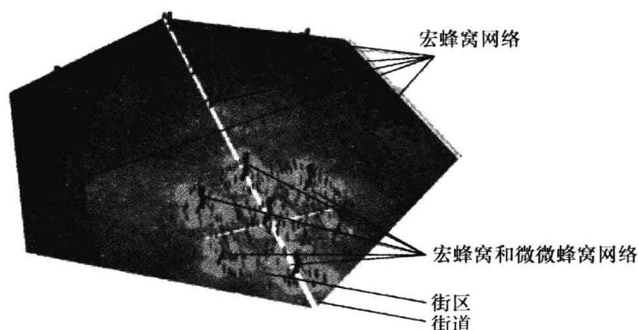
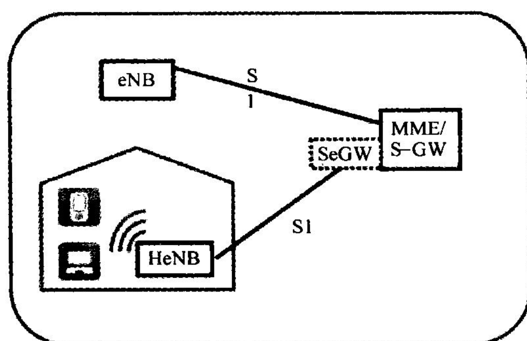
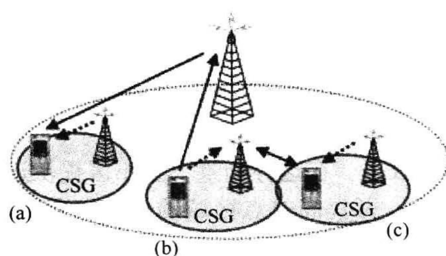


图 2.13　异构网络

HeNB 操作模式包括开放用户组（Open Subscriber Group，OSG）、闭合用户组（Closed Subscriber Group，CSG）或者混合式。CSG HeNB 的使用仅限于自身用户或者有限集合的用户。混合式 HeNB 允许指定运营商的所有用户接入到 HeNB，但是 CSG 成员可能有优先处理的权利。HeNB 的 OSG 和 CSG 模式将在 10.2 节进一步阐述。

如果运营商能够为不同小区类型（如宏小区和微微小区）分配不同的频率，则不会存在干扰问题。如果不采用这样的方式，而是不同小区类型使用相同频率，则面临的主要问题是宏基站的用户和 HeNB 的用户之间会产生干扰，如图 2.14 所示。





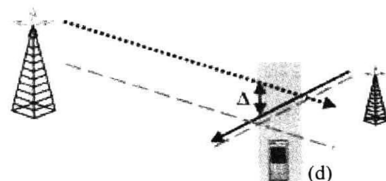


图 2.14　家庭级 HeNB 以及与宏基站之间的干扰（3GPP TR36.814，经 3GPP 准许转载）

HeNB 存在的另一个问题是其位置可能不固定（它们可以在房间内被移动）或者随时被用户关机。3GPP R10 版本中，增强型小区间干扰协调（Enhanced Inter – Cell Interference Coordination，eICIC）用于消除干扰并且已经标准化。异构网络和相关干扰消除机制将在第 10 章进行描述。

异构网络最近已经引起运营商更多的关注。Pico – eNB 用来解决覆盖和容量问题（如在超市卖场部署 Pico – eNB）。Pico 小区可以在运营商控制下以可协调方式部署，由于采用 OSG 工作模式，可以在室内或室外进行部署。

实际上多层网络结构已经是 3GPP R8 和 R9 规范的一部分。R10 新增加了提升多层网络性能的相关机制。

第 10 章详细分析了异构网络及管理控制。由于异构部署方式的复杂性以及运营商难以进行网络规划，这就要求网络管理和网络资源的合理利用都具备高度的自动化控制能力。

2.1.9 网络管理

LTE 沿用了与 3G 相同的由 TS32.101 定义的 3GPP 管理参考模型（2010）（见图 2.15）。运营系统与网元之间的接口如下：

1）Itf – S（见图 2.15 接口 1）：网元（Network Element，NE）和域管理器（Domain Manager，DM）之间的接口。这个接口是设备商的规范。

2）Itf – N（见图 2.15 接口 2）：DM 与网管（Network Manager，NM）之间的接口。这是个标准化开放接口，因此更容易实现多个供应商进行管理。

3）Itf – P2P（见图 2.15 接口 4a）：DM 之间的接口，同时是嵌入在网元中的网元管理器（Element Manager，EM）之间的接口。Itf – P2P 还没有在实际网络中部署。

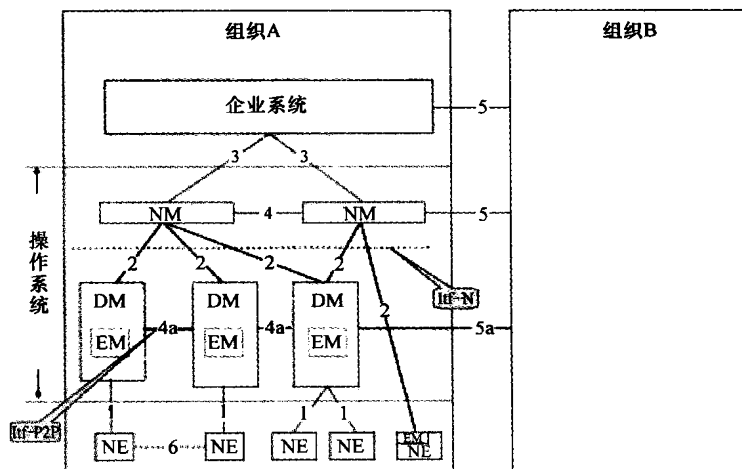


图 2.15　管理参考模型（3GPP TS32.101（2010），经 3GPP 准许转载）

应用于 3G 和 LTE 网络的同一种通信管理方法在 3GPP TS32.102 中描述（2011）。

3GPP 管理基于一接口概念，即集成参考点（Integration Reference Point，IRP）。IRP 是由 IRP 等级和 IRP 类型定义的，如图 2.16 所示。IRP 标准如下：

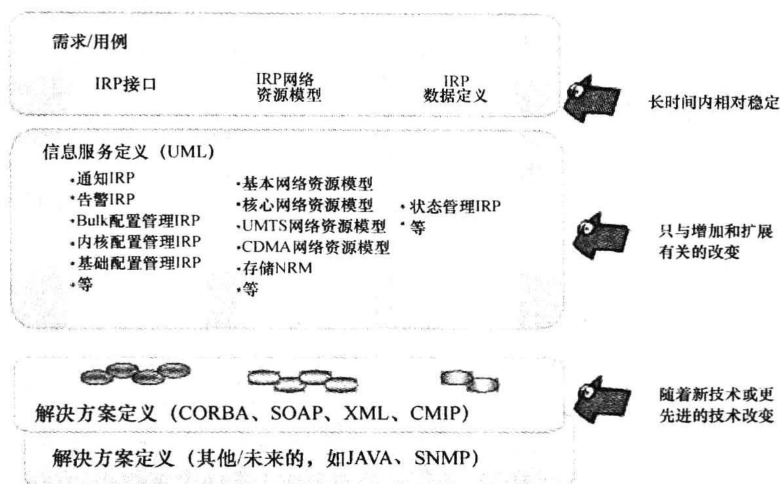


图 2.16　与 3 种 IRP 终端相结合的 IRP 3 层规范方法
（3GPP TS32.103（2011），经 3GPP 准许转载）

1）需求。需求的目的是为特殊管理接口提供概念和用例上的定义，并且定义了该 IRP 接口后续需求。

2）信息服务（IS）：IS 等级提供技术独立定义（中立协议 IS 和网络资源模型：NRM）。

3）解集（SS）：SS 等级不能将 IS 定义映射到技术专有解决方案集合。解决方案集合具有特定协议的（CORBA，SOAP，XML）。

IRP 类型如下：

1）接口 IRP。接口 IRP 定义信息如何共享（执行和通知）。

2）NRM IRP。NRM IRP 定义了管理内容（网络资源模型）。

3）数据定义 IRP。应用于 NRM IRP 中的抽象数据定义。

每种 IRP 类型划分为需求、IS 等级和 SS 等级规范。

SON 功能存在于网络管理（Network Management，NM）、网元管理（EM）或者网元（NE）中，具体存在哪部分取决于用例。SON 功能使用适当接口，如图 2.17 所示。

SON 功能的位置和接口使用情况取决于所研究用例的需求（如多厂商能力、速度、范围）。3.4 节将对 SON 的结构进行讨论。

2.2　LTE 无线接入网络场景和解决方案

LTE 无线接入技术设计灵活，在现有或未来的频谱分配中允许可变的频谱部署。

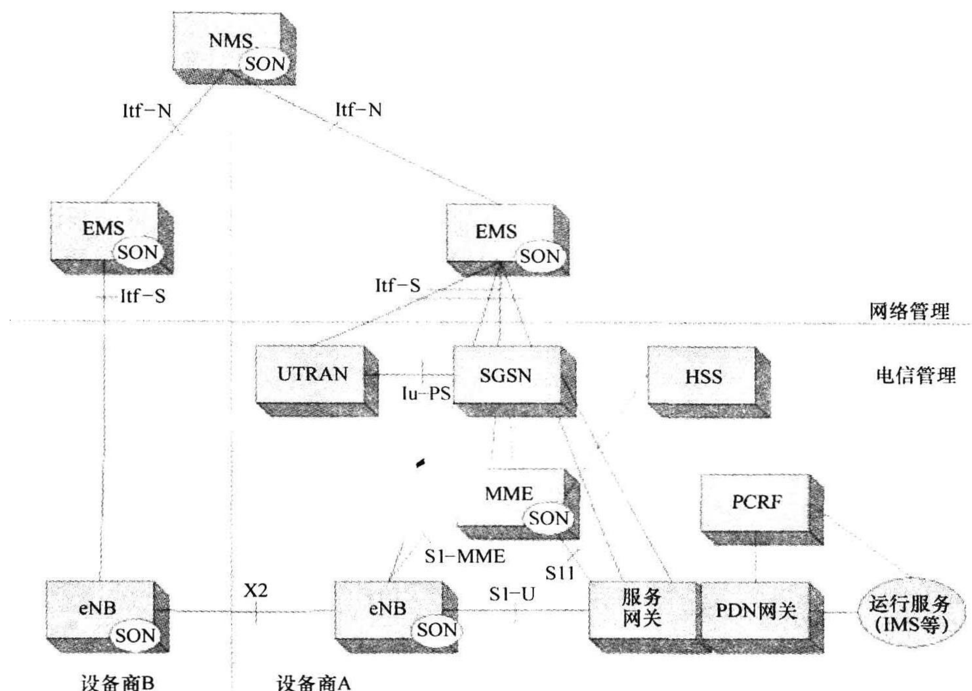


图 2.17　SON 结构（包括核心网、无线接入网络和网络管理）

同时，LTE 能够与目前存在的 3GPP 无线接入技术共存而无需增加 UE 和系统的复杂度。另外，LTE 的重要需求还包括低延迟、高用户数据速率、增强的系统容量和覆盖以及低运营成本。

LTE 初期部署开始于 2010 年，目前 3GPP 的关注点是平滑演进到 LTE - Advanced。正如文中所述，演进目标之一是满足甚至超越由 ITU - R 定义的 IMT - Advanced 的需求。

下面将描述更多的相关网络场景。2.2.1 节所述场景和 2.2.2 节所述场景都是针对 intra - LTE 和 inter - RAT 的宏小区部署，2.2.3 节所述场景引入多层网络，其中重叠层由微小区构成。

SON 用例是 3GPP 针对 LTE 的标准化用例。LTE 与 3G 网络中的最小化路测（Minimisation of Drive Tests，MDT）以及 3GPP R10 中的 3G - ANR 除外，R10 版本中包含 LTE - A 特征。由于 R10 版本已经完成，SON 在一些 LTE - A 特征如载波聚合、CoMP 和增强 MIMO 技术中的应用将在后续版本中进行描述。另一方面，异构网络已经包含了一些 SON 的功能，R10 版本的中继节点定义了基本 ANR 功能（参考第 4 章的 ANR 篇幅）。

LTE 有多种部署方式，取决于运营商的网络和需求，以下内容将描述更多相关的网络场景和 SON 功能。

2.2.1 LTE 无线覆盖场景

通过稀疏部署的微小区形成的无线覆盖场景中，宏基站典型的输出功率为数十瓦，无线覆盖范围取决于使用的频率和地形。

由于数字红利频段在欧洲的应用，这一案例非常重要（见图 2.18 的多层网络用例）。随着电视信号从模拟信号到数字信号的转换，800MHz 频段上大量的频谱是免费的。欧盟推动数字红利频段步履艰难，目前欧盟成员国正处于将模拟信号转换成数字 TV 信号的过程中（或者计划要进行）。数字红利频段的目标是有效地开创了跨国界的单一移动带宽市场。

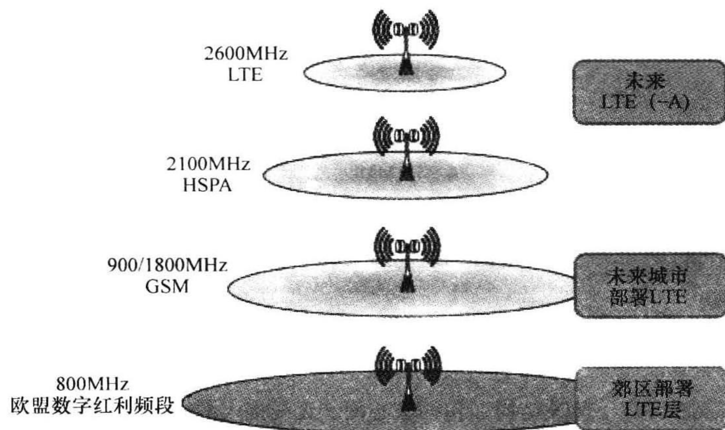


图 2.18　数字红利频段和 LTE 多层结构

在许多市场，如在德国，运营商在将 LTE 部署在城区之前，先要获得在郊区部署 LTE 的许可。该策略的目标是在既没有 3G HSPA 覆盖又没有部署 DSL 业务的区域内为欧盟成员国居民提供 LTE 覆盖。

另外，这种场景是在某区域没有移动网络覆盖，如 Greenfield 某家运营商，或者运营商有其他网络覆盖而没有必要在已有该网络覆盖的区域上部署 LTE（如独立无线宽带应用场景，见图 2.19）

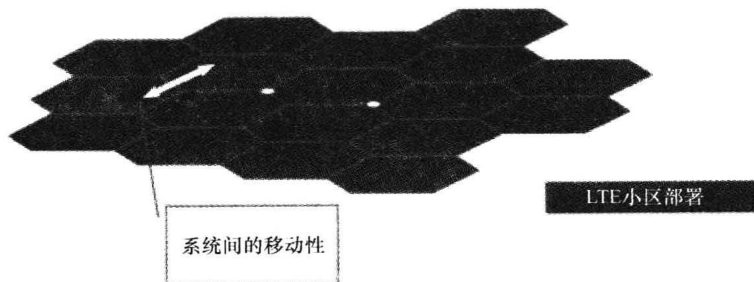


图 2.19　LTE 稀疏部署场景

2.2.2　LTE 对现网的扩容

这是现有运营商使用的典型场景，主要需求是为了有效地使 LTE 与现有的 UTRAN/GERAN 网络共存。

由于成本原因，LTE 覆盖很可能仅限于人口密集区域，如城市中心，并且 LTE 基站很有可能与 2G/3G 基站进行共站址部署。在这种情况下所面临的主要问题是如何实现 LTE 的有效利用。第 5 章将详细介绍优化的切换门限（如第 3 章将介绍的，称为移动性健壮优化）和流量疏导策略及机制。图 2.20 所示为 LTE 与 UTRAN/GERAN 架构共存的实施方案。

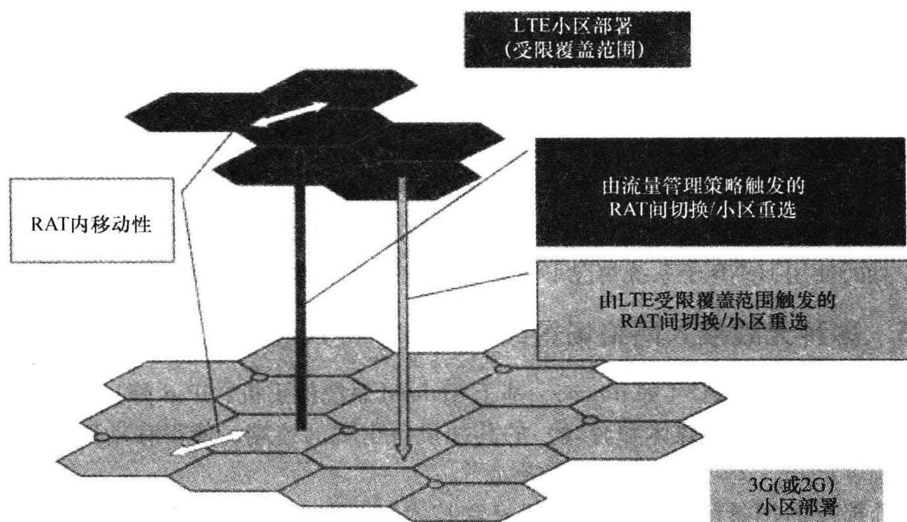


图 2.20　LTE 与 2G－3G 网络共存

2.2.3　多层 LTE

正如前面提及，在数据需求较高的区域，巨大的数据流量增长需要更大的网络容量，除了宏小区外，可以通过部署微小区来解决容量需求问题。另外，中继节点可以提高小区边缘的系统容量。

在这种情况下，网络由多个叠加的无线网络层组成，可以使用相同（共信道部署）或不同频率（见图 2.21）。

除了多层结构场景，运营商也可以部署安装 GERAN/UTRAN 网元的多 RAT 网络。

由于需要配置和优化大量的基站和参数，网络的复杂度大大提升，为此 SON 针对以上网络结构尤为重要。例如前面所提的异构网络（将在第 10 章进行详细描述）。

2.2.4　LIPA－SIPTO 的数据分流

3GPP 为 HeNB 子系统和宏层网络（3GPP TR23.829，2011）提供本地 IP 出口路

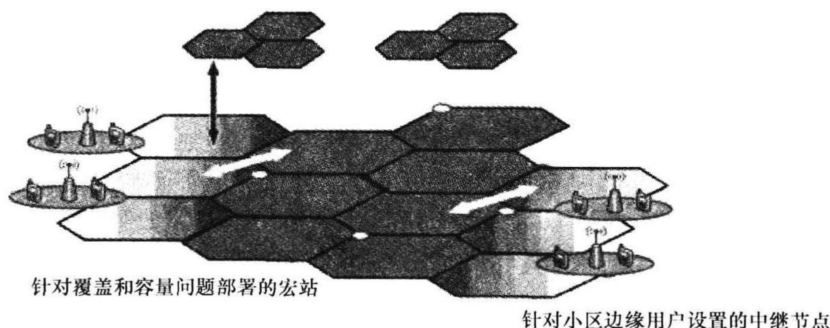


图 2.21　多层 LTE

由优化策略。

LIPA 是关于针对 HeNB 子系统的住宅/企业本地网络的本地 IP 接入，同时 SIPTO 针对 HeNB 子系统和 3G/LTE 宏网络考虑选择性 IP 流量负载分流，因此 SIPTO 只考虑了如何将互联网数据流量从本地 3GPP 接入网发送到互联网。另一方面，LIPA 定义了在用户处所使用 HeNB 子系统情况下对私有网络资源的接入。

2.2.5　多种无线接入网络场景或非 3GPP 接入场景

智能终端、平板 PC（如 iPhone、基于 Android 系统的手机、iPad 等）以及支持非传统移动应用（如社交媒体和游戏）的其他设备出现的终端，使得移动网络的数据业务大幅度提升，运营商面临极大的挑战。

先前提及的场景已经阐述了不同蜂窝技术（GSM/ GPRS/EDGE、3G、HSPA 和 LTE）之间的 RAT 选择。除了“纯移动解决方案”，3GPP 定义了三种不同的固定移动融合（FMC）网络架构，通过把移动互联网业务分流到使用 WLAN 和 IP 接入（3GPP TS23.234，2011）的非 3GPP 网络，来缓解无线接入网络的压力。

非授权移动接入（UMA）技术是最早的技术，它使得在无线局域网上允许所有 2G 服务，最近也允许 3G 服务（3GPP TS43.318，2011）。WLAN 是更近的技术，在 WLAN 网络上提供基于分组的服务，同时在传统 3GPP CS 网络上保持电路语音业务。

第三种选择是接入网发现和选择功能（Access Network Discovery and Selection Function，ANDSF），它基于 R9 版本，具有提高网络选择和应用的功能（见图 2.22）。

如果接入选择由终端用户决定，数据流量就不能以良好的方式进行疏导，也就是说，不能达到负载均衡和干扰最小化。为了使运营商对 3GPP/非 3GPP 接入选择有影响，引进一系列机制来传送运营商针对设备的 3GPP/非 3GPP 接入选择策略，当选择 3GPP/非 3GPP 任何一种接入网络时，强制设备考虑这些策略。3GPP TS23.402（2011）描述了通过非 3GPP 接入网络接入到 EPC 的规则。ANDSF 功能定义了网络发现过程，该功能在 3GPP TS24.302（2011）和 3GPP TS24.312（2011）中进行了描述。

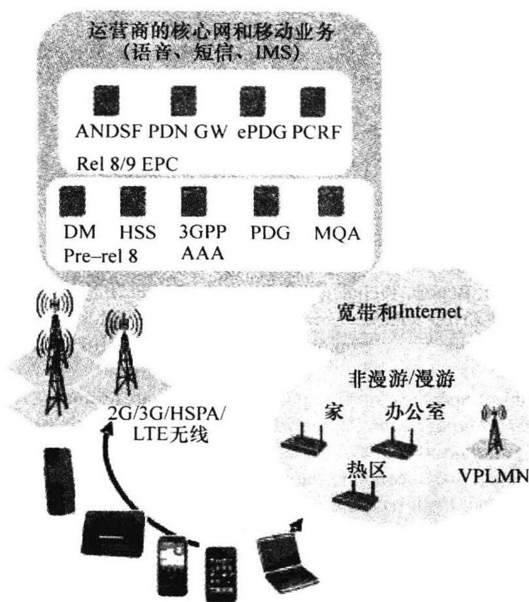


图 2.22 利用 ANDSF 实现 WiFi 数据负载分流

利用 ANDSF 机制，UE 最初接入到 3GPP 网络，凭借 AAA 机制进行鉴权和认证。一旦 UE 被鉴权和认证，运营商制定的 ANDSF 策略可能会针对 UE 特定位置对 WiFi 热点进行优化。这是一项强有力的策略，它使运营商将“数据饥饿”的移动终端和应用分流到 WiFi 接入点。然而 WiFi 存在几点缺陷，如当接入点密度增长时会引起较大干扰问题。这是因为 WiFi 接入点不能控制它们的输出功率，并且接入点距离非常接近引起相互之间的信号淹没（共信道干扰）从而导致覆盖漏洞。另外，无法很好地支持移动性，对于静止用户而言，WiFi 也仅能提供尽力而为的服务，当某个接入点出现大量用户同时接入时，用户的业务会话可能被终止。

参 考 文 献

3GPP (2011) 3GPP: the Mobile Broadband Standard. Specifications. Available at http://www.3gpp.org/ftp/specs [accessed 02 September 2011].

3GPP TR25.913 (2009) Technical Report Technical Specification Group Radio Access Network, *Requirements for Evolved UTRA (E-UTRA) and Evolved UTRAN (E-UTRAN)*, ver.9.0.0., Release 9, 27 December 2009. Available from http://www.3gpp.org/ftp/Specs/latest/Rel-10/24_series/24913-900.zip [accessed 30 June 2011].

3GPP TR23.829 (2011) Technical Specification Group Services and System Aspects, *Local IP Access and Selected IP Traffic Offload (LIPA-SIPTO); System Description*, ver.10.0.0., Release 10, 29 March 2011, http://www.3gpp.org/ftp/Specs/latest/Rel-10/23_series/23829-a00.zip [accessed 30 June 2011].

3GPP TS23.228 (2011) Technical Specification, Technical Specification Group Services and System Aspects, *IP Multimedia Subsystem (IMS); Stage 2*, ver.10.5.0., Release 10, 10 June 2011. Available from http://www.3gpp.org/ftp/Specs/latest/Rel-10/23_series/23228-a50.zip [accessed 30 June 2011].

3GPP TS23.234 (2011) Technical Specification Group Services and System Aspects, *3GPP System to Wireless Local Area Network (WLAN) Interworking*, ver.10.0.0. Available from http://www.3gpp.org/ftp/Specs/latest/Rel-10/23_series/23234-a00.zip [accessed 30 June 2011].

3GPP TS23.272 (2011) Technical Report, Technical Specification Group Services and System Aspects, *Circuit Switched (CS) Fallback in Evolved Packet System (EPS); Stage 2*, ver.10.4.0., Release 10, 10 June 2011. Available from http://www.3gpp.org/ftp/Specs/latest/Rel-10/23_series/23829-a40.zip [accessed 30 June 2011].

3GPP TS23.402 (2011) Technical Specification, Technical Specification Group Services and System Aspects, *Architecture Enhancements for non-3GPP Accesses*, ver.10.4.0., Release 10, 10 June 2011. Available from http://www.3gpp.org/ftp/Specs/latest/Rel-10/23_series/23402-a40.zip [accessed 30 June 2011].

3GPP TS24.302 (2011) Technical Report, Technical Specification Technical Specification Group Core Network and Terminals, *Access to the 3GPP Evolved Packet Core (EPC) via non-3GPPAccess Networks*, ver.10.4.0., Release 10, 14 June 2011. Available from http://www.3gpp.org/ftp/Specs/latest/Rel-10/24_series/24302-a40.zip [accessed 30 June 2011].

3GPP TS24.312 (2011) Technical Specification Group Core Network and Terminals, *Access Network Discovery and Selection Function (ANDSF) Management Object (MO)*, ver.10.3.0., Release 10, 14 June 2011. Available from http://www.3gpp.org/ftp/Specs/latest/Rel-10/24_series/24312-a30.zip [accessed 30 June 2011].

3GPP TS32.101 (2010) Technical Specification Group Services and System Aspects, *Telecommunication Management; Principles and High Level Requirements*, ver.10.0.0., Release 10. Available from http://www.3gpp.org/ftp/Specs/latest/Rel-10/32_series/32101-a00.zip [accessed 30 June 2011].

3GPP TS32.103 (2011) Technical Specification Group Services and System Aspects, *Telecommunication Management; Integration Reference Point (IRP) Overview and Usage Guide*, ver.2.0.0., Release 10. Available from http://www.3gpp.org/ftp/Specs/latest/Rel-10/32_series/32103-a00.zip [accessed 30 June 2011].

3GPP TS36.300 (2011) *E-UTRA and E-UTRAN; Overall Description; Stage 2*, ver.10.3.0., Release 10, 22 June 2011. Available from http://www.3gpp.org/ftp/Specs/latest/Rel-10/36_series/36300-a40.zip [accessed 30 June 2011].

3GPP TR36.913 (2011) Technical Specification Group Radio Access Network, *Requirements for Further Advancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (EUTRA)*, ver.10.0.0, Release 10. Available from http://www.3gpp.org/ftp/Specs/latest/Rel-10/36_series/36913-a00.zip [accessed 30 June 2011].

3GPP TS43.318 (2011) Technical Specification Group GSM/EDGE Radio Access Network, *Generic Access Network (GAN); Stage 2*, ver.10.1.0., Release 10. Available from http://www.3gpp.org/ftp/Specs/latest/Rel-10/43_series/43318-a10.zip [accessed 30 June 2011].

Ghosh, A., Ratasuk, R., Mondal, B. *et al.* (2010) LTE-advanced: next generation wireless broadband technology. *IEEE Wireless Communications*, **17**(3), 10–22.

GSMA (2010) *IMS Profile for Voice and SMS*, GSM Association, PRD IR.92, ver.1.0.

Holma, H. and Toskala, A. (eds) (2011) *LTE for UMTS: Evolution to LTE-Advanced*, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester.

Mogensen, P.E., Koivisto, T., Pedersen, K.I. *et al.* (2009) LTE-advanced: the path towards Gigabit/s in wireless mobile communications. IEEE Wireless VITAE Conference, pp. 147–151.

第3章　SON

Richard Waldhauser、Markus Staufer、Seppo Hämäläinen、Henning Sanneck、Haitao Tang、Christoph Schmelz、Jürgen Goerge、Paul Stephens、Krzysztof Kordybach 和 Clemens Suerbaum

3.1　背景

由于移动蜂窝通信系统固有复杂度较高，管理该无线网络的工作尤为艰巨。产生这种复杂度的原因在于需要部署和管理的网络设备的数量庞大，同时设备配置之间互相依赖。当运营商引入 LTE 架构并在现有的 2G/3G 网络上运行时，无线设备需要无缝集成，系统复杂度会进一步增加。在这样的异构网络场景中，多样性部署技术和特定的运维范例很难权衡处理。

通常情况下，网络管理基于集中式的操作、管理和维护（OAM）架构进行。在规划和优化工具的支撑下，网元设备的配置和优化由 OAM 系统［也被称作运维中心（OMC）］集中处理。目前的规划和优化工具通常是半自动的，管理工作需要运维人员密切监管，如图 3.1 所示，运维人员的这种投入不仅耗时、费钱、容易出现差错，

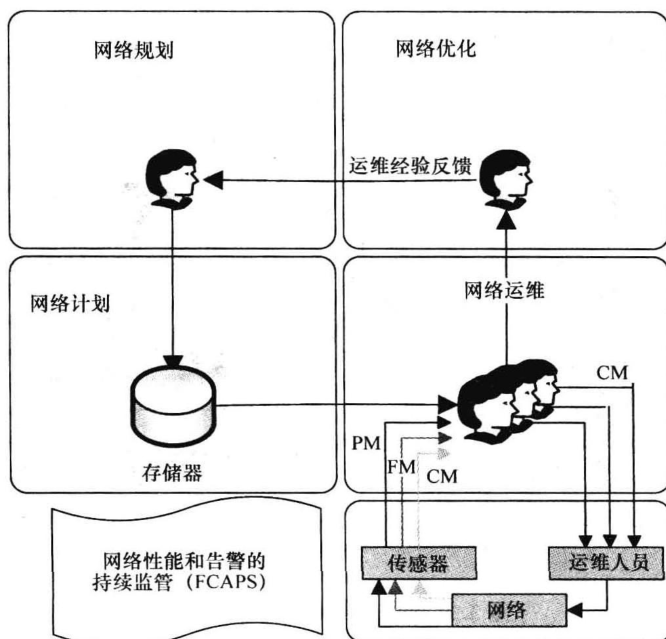


图 3.1　人工网络操作

而且要求运维人员有丰富的经验。因此，有必要构建一种网络以便运维人员能基于已分析的数据重新搭建网络。运行网络时相关的处理和工作流程包括：用于提供网元设备性能衡量指标的性能管理（PM）、用于告警的故障管理（FM）和用于设置网络设备参数的配置管理（CM）。具体来说就是通过不同传感器 PM/FM/CM 路径建立相关的认知，并把它和随后的配置联系起来，这会引发大量的人工操作。例如，软件的更新或者不同传感器加入新网元设备时，操作流程会发生相应变化。运维人员利用实际操作经验可以找到最优的配置，并且知道何时能偏离标准过程。特别地，差错管理过程也需要操作经验。

通过减小运维人员的工作量，以及减少相应的人为差错，自组织网络可以用来减少运维成本，以保证收益。通过增加网元设备（NE）、域管理器［DM，也称为设备管理（EM）］和/或者网络管理［NM（也称为雨伞管理）］系统的自动化程度，可将运维过程中的人工交互降到最低值，挑战也由此产生。3GPP 在自组织网络框架标准化进程中也强调了这一点（3GPP TR32.500，2011）。引入 SON 技术的主要目的在于通过自动化操作，降低运维人员的工作负担，使其免于这些费时的基本工作，而能够把精力集中在关键问题上。最终目标是能逐渐地将系统从人工规划和配置转换成完全基于 SON 网络监管和控制。最终，该系统只需插入和更新高级的引导就可监管系统的实际变化，而不必通过人工进行配置管理控制存储器（CM）。因此，PM/FM/CM 传感器的路径更集中化，并与 CM 操作有联系，如图 3.2 所示，运维人员角色因此发生改变，这可以看作网络运行方式的根本转换。伴随 SON 的引入，运维人员的工作转移到更高的管理级别上来，他们的任务是监控 SON 处理过程，并只需在必要的时候进行干预。因此，运维人员可以摆脱频繁琐碎的日常工作，将精力放在完成制定能指导 SON 功能发挥的政策上来。

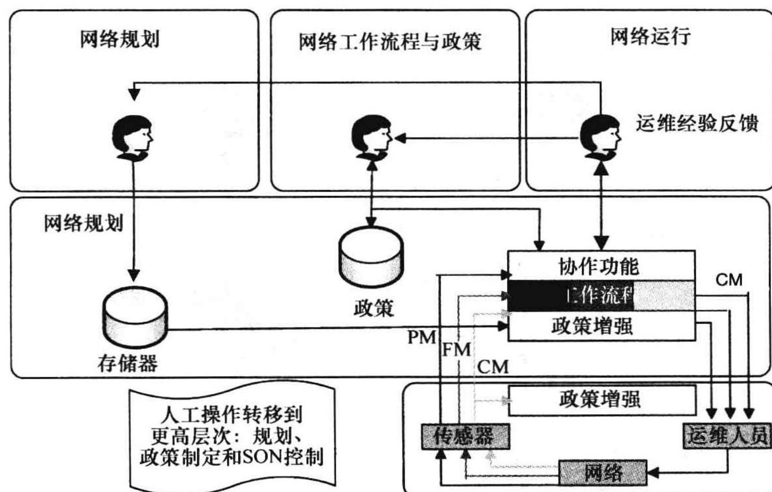


图 3.2 闭环自动化的网络管理

达到 SON 级别系统的构建模块包括工作流执行系统和实际管理环。工作流程执

行系统既可看作一种自动执行 SON 功能的方式，也可认为是一种自动决策制定政策系统（Sanneck 等人，2010）。工作流程的执行政策控制和控制适应将在下面叙述。利用该政策可以不考虑技术细节，在运行时间内直接改变系统行为。一些 SON 功能可以在工作流程执行系统的控制下实现，实现过程中，每一个 SON 功能实体独立完成各自特定的任务。工作流程执行系统和 SON 功能独立协作，这样的好处是可以避免相互之间发生冲突。这两种组件共同受到运维人员的控制，以保证多个功能实体同时运行时 SON 系统的稳定性。

对网络运营商来说，管理环是闭环且自动的，有望节省运维支出。一旦 SON 进行自动重新配置，必须保证运营商能全面理解新配置，并且能恢复设定的初始配置。这就保证了运维人员总可以控制 SON 配置。

SON 具有自配置、自优化、自愈功能，可以根据不同需要在 NE、DM 或者 NM 级设置实现（参阅 3.4 节架构部分）。实际系统中，不同 SON 功能实体要求不同，这就产生了综合多种 SON 功能的混合结构。一些 SON 功能可能要求对改变的网络性能做出非常快速的反应，因此这样的功能应该在网元设备中实现，如基站。另一方面，另一些功能虽然可以容忍更多的延迟，但要求在配置发生改变时，需要全面掌握网络状态和应用情况，因此该功能实体需要在 DM 和 NM 级别上实现。为了满足多供应商或者多技术可用性的需求，要求网络架构基于标准接口，如基站内部接口 X2，或者开放北向管理接口 Itf - N。

实际的 SON 系统是标准化和特定供应商 SON 功能的结合。3GPP 标准定义了必需的接口、测量和信令以更好地支持多供应商可用的 SON，而 SON 内部逻辑总是针对特定供应商的。另外，除了在第三代合作项目（3GPP）和下一代移动网络（NGMN）联盟中给出的关于网络管理自动化方案定义外，供应商可以设计自己的解决方法。

3.2 NGMN 运营商用例和 3GPP 中的 SON 用例

2007 年，NGMN 出版了一系列运营商 SON 用例（NGMN，2007），随后 2008 年，又出版了 SON 相关的用例集（NGMN，2008）。这些应用场景来源于运营商在部署和运行无线移动网络中面临的需要解决的典型问题。这些 NGMN 用例很大程度地影响 3GPP 标准化中 SON 相关工作，也对 SON 相关研究项目起到一定作用（参见 3.3.3 节）。反之亦然，NGMN 也受到 3GPP 标准和相关讨论中涉及的 SON 功能的影响。随后，针对 3GPP OAM 标准中考虑的相应的运营商的要求，NGMN 出版了高效运营建议（NGMN，2010）。

这一部分首先高度概括了（NGMN，2007）和（NGMN，2008）中的 NGMN SON 用例，随后介绍（NGMN，2010）中个人用例的建议和目的，最后概述了 3GPP 正在致力于用例的情况，包括和相应的 NGMN 用例的对应。

3.2.1 操作用例

基于工作流模型可以构造 NGMN 的运营用例。工作流模型针对新设备规划、设置和配置过程中需要解决的不同的任务。这些结构产生了下列类别的运维用例：

1）规划；

2）部署；

3）优化；

4）维护。

图3.3描述了这些分类中的主要部分，为了简化表达，图中并未详细给出这些类别的互操作。然而应注意到这些类别之间有交叉，如一个新网元设备的部署可能会导致网络重新规划或者优化，或者维护类别中网络的监管可能激发优化类别中的相关操作。

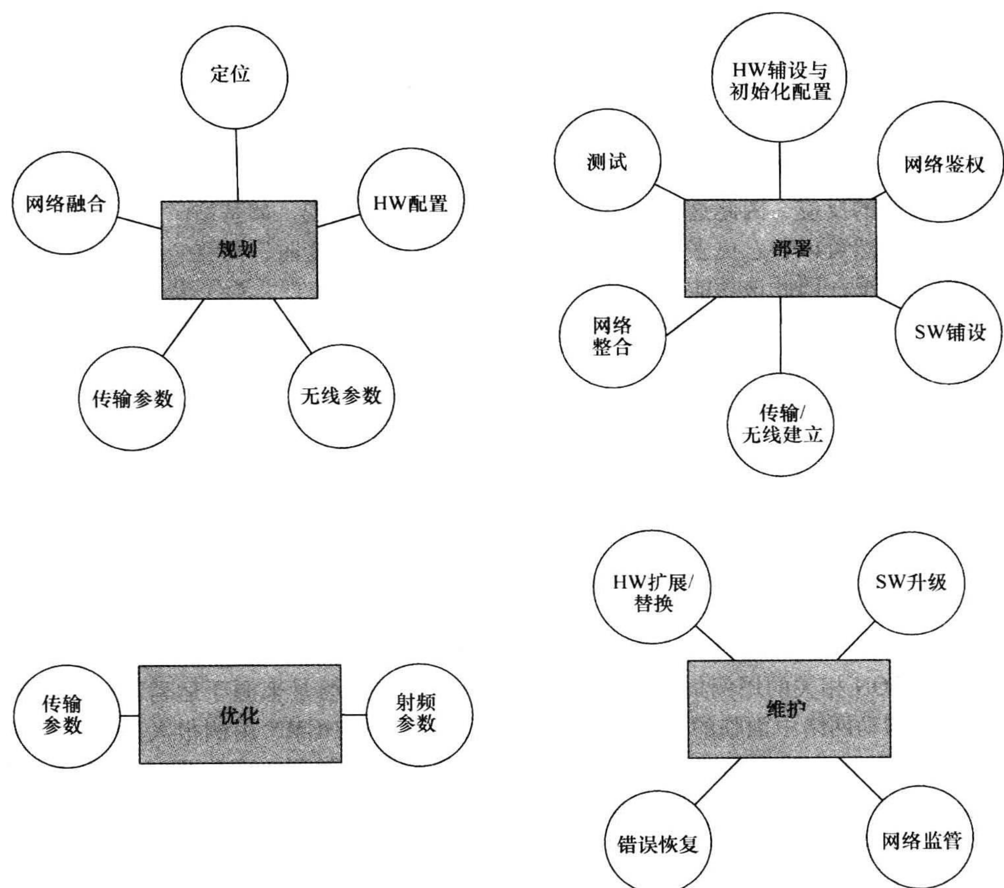


图3.3 NGMN运维用例

3.2.1.1 规划

在传统的管理中，网络运营商需要周期化重新配置整个无线网络，以适应下列场景：

1）容量、覆盖范围、性能需求发生变化，这种变化可能基于对运行网络的长期性能评估和差错分析、新设备的引入或者基于运营商的业务需求。

2）技术要求发生变化：例如，对网元设备的硬件或软件进行交换或修正。

如上所述，对网络的周期化重新配置产生了网络规划周期，如图3.4所示，网络规划周期开始于对网络数据的长期分析、性能评估和差错管理（1）。这种评估产生的需求与高新技术、服务或业务需求一起作为网络规划的输入（2）。这些需求输入系统后，网络规划产生了一系列变化需求。为了决定网络的新配置方式，所有网元设备当前的配置方式需要上传到网络规划（3）。基于这些数据和需求变化情况，新的配置据此产生（4）。通过对比新的配置和当前配置，网络规划编译一个包含所有改动的delta配置（5）。这种delta配置最终转向网元设备（6）。

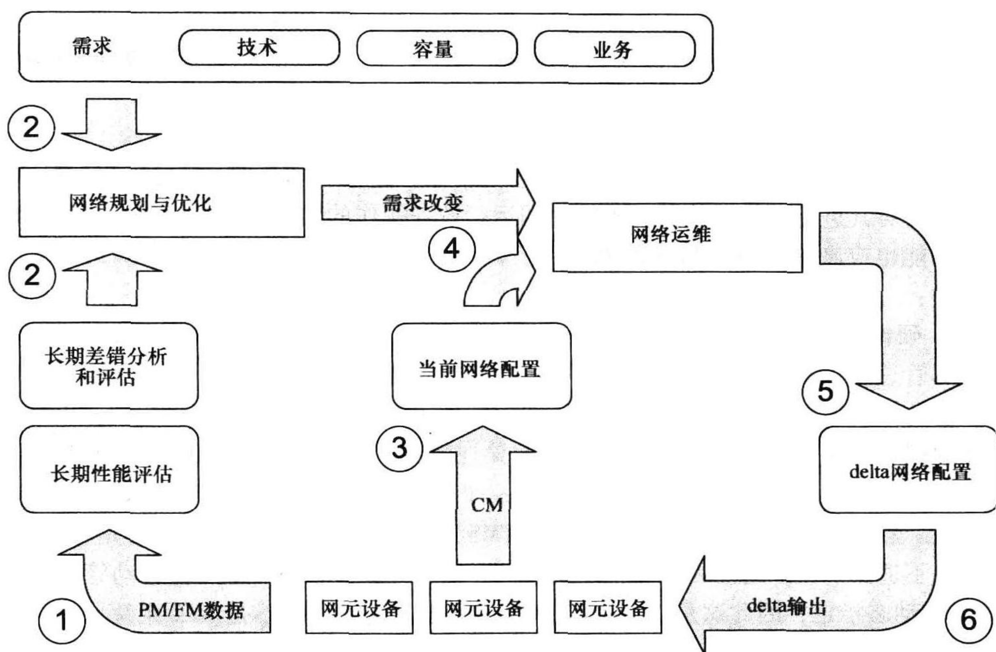


图3.4　网络规划、优化和运行周期

这些新配置的计算是通过特定的离线规划工具来执行的，从获取当前网络配置到推出新的delta配置，这一工作可能需要几天到几周的时间。而由于日常网络管理调整（由于中断或性能问题产生短期配置变化），或由于移除/交换硬件和软件，或由于整合新网络设备，极有可能当前网络配置在这个工作时间内发生变化。从这个角度说，事实上，推出的delta配置并不是基于系统当前配置，这会导致网络配置的不持续性。而这种不持续性会致使系统发生故障，至少是告警，因而降低系统性能。

因此，运营用例中属于规划类别的，包括准备和供应新基站的正确参数设置。考虑在预定位置处的操作，新部署的设备需要能和已经铺设的相邻节点平滑协作，且能适应当地的无线环境。下列运营用例包括规划类别中的任务：

1）位置规划：位置应满足覆盖和容量需求。网络的覆盖和容量目标由用户反馈、现有的服务质量和需求、计划服务需求共同决定。

2）HW 配置规划：基站 eNB 或天线决定最合适的 HW 配置，基于该需求进行规划。

3）无线参数规划：典型的参数是功率、斜率和切换场景。这些参数需匹配热点或者邻区设备。邻区设备列表应包含重要的参与小区以完成切换。值得注意的是，参数设置过程中还需考虑包括中继节点和 HeNB 在内特殊场景需求，详见 2.2 节。

4）传输参数：涉及传输网络的配置，该配置中要求将 eNB 与相邻节点连接起来。一个典型的配置参数是必要 QoS 和传输层的地址参数。

5）网络集成：这部分需要考虑相邻节点、安全网关、服务 GW、MME 和 O&M 节点的合理选择。这些节点的本地数据库必须和新的 eNB 相互匹配。

对后三个 NGMN 用例的长期目标是将其用部署、优化、维护用例类别提供的 SON 功能进行取代。

3.2.1.2　部署

部署类别包括与新基站部署相关的应用场景，这意味着在选定的区域设置 eNB 硬件，并对其进行配置，使其达到能立即运行业务操作的状态。支持这类运维用例的 SON 功能也应该包括更新与邻基站相关，同时影响核心网络的节点。下列用例属于部署类：

1. 硬件铺设和初始化配置

尽管这步主要由人工处理，但 SON 实体能实现所有器件，像天线、管道、板、笼子等的即插即用行为。举例来说，天线的即插即用包括自动测量天线损耗，以及对节点数据库相应数值进行初始化配置。应该注意到，为了完成网络优化，RAN 节点要求重新配置。例如，当运营商决定在另一个位置应用 eNB 的情况下，RAN 需要重新配置。然而，通常认为临时移动用户（TMS）情况很罕见。另一个例子是再返航，但它并不适用 eNB，这是因为在 LTE 系统中，服务网关（S－GW）被移动管理实体 MME 池动态指定，因此这是 2G 和 3G 网络部署中的任务，而不是 LTE 系统的。从工作流的观点来看，这些例子主要受到下面两种用例的影响：

1）再定位：这个用例扩展了重新确定基站物理位置时相关的配置工作流程，也就是说，基站从初始位置解安装并移除，再在另一个位置重新铺设。

2）再返航：这个用例包含了重新配置无线节点的工作流程，这样设置的目的是能和不同的无线节点控制器配对，或者和不同的网元管理器（EM）连接。

2. 网络鉴权

基站需要发现网元管理器（EM），并进行相互节点认证。

3. 软件安装、传输和射频参数设置、网络融合

根据规划过程，eNB 安装相应的软件后，重新得到默认的数据库、传输和射频参数配置数据。相关的邻基站、MME、服务网关的配置需要根据新铺设的 eNB 进行调整。

4. 测试

新的基站必须完成自测试才能投入商用。除了测试硬件设备，还需要测试馈线损耗、无线性能和网址兼容性。

这么做的目标是在这种用例类别下能实现高度自动化。

3.2.1.3 优化

为了支持移动网络动态特性产生的业务需求，运营用例中优化类十分必要。这种情况下，持续进行部署新网址或扩展容量，另外通过新的建筑物或高速公路时，环境条件也会发生改变。尤其在白天，网络负载和用户分布的动态范围变化显著。典型的网络优化操作可以描述成检查网络性能、检测不匹配参数、优化确定参数这样一个重复循环。

1）射频参数优化：射频参数优化的例子包括小区列表优化、HeNB 部署在内的干扰控制、切换参数优化、RACH 优化和 QoS 参数相关优化。

2）传输参数优化提供了最优化的 S1/X2 的连接和网状网络的数据路由。

根据运营商设定的覆盖驱动、容量驱动、性能驱动，上述优化处理产生不同操作。SON 功能的目标是根据优化任务尽可能简化系统。这暗示规划类别操作用例对参数的精确定义并没有严格要求。

3.2.1.4 维护

维护用例类别包括运营商对移动网络的日常操作相关的任务。该用例可以划分为下列子类：

1）硬件扩展/替换：此处典型操作是通过提供额外的硬件和检查硬件库存和必备硬件，把硬件替换成一个较小服务中断、性能或容量的扩展。相应的工作流程严格地由将要添加的和改变的元件组成：主要元件设备的更换要求基本配置数据的更新、配置的完全重新运行，在此情况下需要用例。

2）软件升级：要求最小化操作注意和服务影响项。

3）网络监管：这个子类旨在 RAN 性能测量恢复和分析，已达到实现识别网络缺陷、供应商内部无缝支撑和复杂的跟踪功能的目的。

4）差错恢复：网元设备中断恢复的任务并不复杂，无需专门技能的专家。

参照 SON 功能，这类运营用例的目标是允许日常工作中进行智能操作和维护。SON 功能极有可能减少运维成本和花费。

3.2.2 NGMN 的 SON 用例和需求

2010 年 NGMN 出版刊物的第二部分描述了最重要的运营用例，也提供了建议、解决方案和标准的提案，以保证这些提议能被标准采纳。这些 NGMN 对 SON 提出的高操作效率建议的概述将在图 3.5 中描述。

NGMN 的整体目标（NGMN，2010）是以尽可能高的效率运行和维护多供应商网络。本书也综合了之前 NGMN 中表述的在运行领域的十大主要建议。至于 SON 运维效率，文件针对 3GPP SON 用例制定需求，并把最近的标准化工作作为主要研究，如最小化路测和节能研究。和前面的章节不同，本章其余部分从运维效率的角度给出了简述运营商的 SON 用例。

3.2.2.1 SON 的 Q&M 支撑

当前，各网络运营商均认为 SON 及其相关优势是 LTE 系统重要的商业特征，并

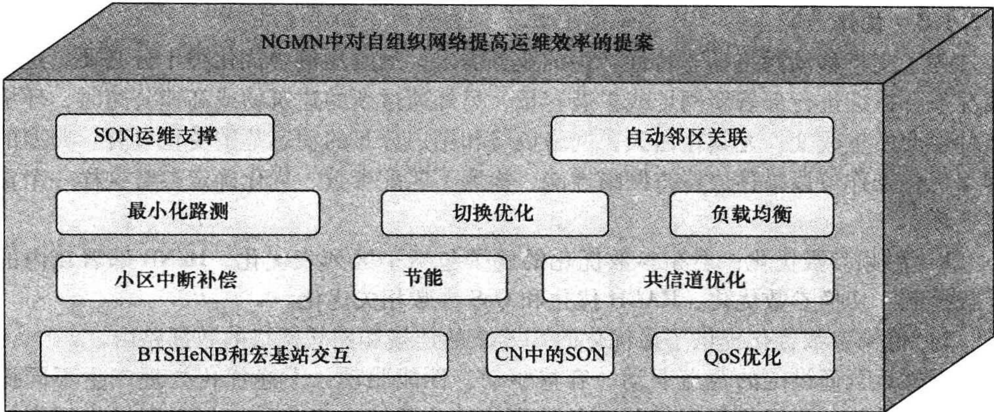


图 3.5 NGMN 中对 SON 提高运维效率的提案概述

大力推进。因此，需要通过制定合适的管理控制政策，以保证网络运营商可以控制所有的新的 SON 功能。

3.2.2.2 最小化路测

网络运营商主要依赖人工路测进行收集场地测量数据，以监管和优化网络性能。然而，人工路测往往需要耗费很大的资源和时间，而且人工路测只能在特定场景进行（如马路）。然而用户和流量也分在路测测不到的地方（如室内环境）。因此，自动收集场景测量数据的优势十分明显，可以最小化运营商对人工路测的依赖性。

3.2.2.3 切换优化

切换优化涉及切换参数的自优化，如切换邻区列表、邻区特定门限值和滞回参数值。该用例旨在减少切换过程导致意外结果的发生，如过早或者过迟切换以及切换到错误小区会导致的通话中断情况。另外，该用例还可以减少两个小区之间不必要的切换和切换乒乓效应。

3.2.2.4 负载均衡

在一个给定冗余度的网络中，负载均衡通过共享负载信息并作出适当反应，可以把容量受限资源的负载移动至容量充裕的资源上去。

3.2.2.5 节能

综合节能网元实体设备需要提供备用模式，这种模式有最小的功率耗费和开关通断概率。开关通断模式的切换可以通过远程网管系统控制，或者由管理系统设备设置的进入和离开备用模式门限值设定。这种操作对用户产生影响，进入备用模式时不会导致通话中断。在现有网络中还可以使用基于性能数据的高级网络管理系统，这样可以实现自动容量驱动的节能模式。然而，基于 PM 数据评估的解决方案比当前普遍使用的 PM 递送数据的方案要求更短的粒度周期。因此，集成在网元设备或网元管理器的 SON 功能可以做到控制冗余容量实时动态关闭。

在转到备用模式前，需要考虑相关限制条件：需要保证对紧急电话充分覆盖、在

小区或协同定位小区内无差错发生、网址或协同定位的网址可以提供、提醒命令必须奏效（如果不是自动的）、避免“溜溜球效应”、“VIP 小区”无备用模式等。在离开备用模式时，也需要进行相应考虑。

3.2.2.6 小区中断管理

很多原因都会导致小区或扇区中断，包括功率供应失败、无效的回传连接、硬件故障或软件故障（后者会导致“睡眠小区”）。小区中断可以通过数据分析、报警或用户投诉检测出来。有时候，可能花费几个小时甚至几天的时间检测链路故障，并找到引发中断的潜在问题。这可能只涉及小区中特定的服务（如 HSPA、GPRS）。小区中断管理可以分为两个子功能：小区中断检测（COD）和小区中断补偿（COC）。COD 的目标是自动检测出发生故障或性能较差的小区，在检测完成后，COC 功能可以提供解决方案以恢复失效服务（软件故障时，可能只需相应基站重新启动即可），或补偿相应小区的服务损失，同时不能降低周围小区重要的质量指示符。当故障恢复后，发生故障的小区会自动重新配置。

3.2.2.7 共信道优化

基于用户和网络共信道性能的测量数据，共信道优化主要目标是对常用信道的上下行参数进行优化。基于这些测量数据，SON 功能可以优化共信道性能。

3.2.2.8 HeNB 和宏基站的交互

在有 HeNB 的场景中（HeNB，家庭基站节点，参见 2.1.8.5 节），由于 HeNB 和宏基站需要进行干扰管理，以及两者之间移动鲁棒性优化和负载均衡，因此需要对其特殊考虑。在应用相应的 SON 功能后，预期的目标是无需运营商介入的，宏基站能够自动控制由于非协作 HeNB 的部署而引入的干扰。SON 功能应当允许 HeNB 的发送功率自动调整，以改善宏小区用户所受的干扰。另外一个很重要的目标是实现小区资源的物理资源动态分配，这样可以避免 HeNB 和宏基站的干扰。

3.2.2.9 核心网络 SON

下面是核心网络中主要的 SON 用例：

1）eNB 部署时，核心网络节点支持其即插即用；

2）核心网节点即插即用建立；

3）核心网内以及核心网与 eNB 间的负载均衡；

4）运维用例，如提高监管性能、配置管理、存储和网关（SW）管理。

3.2.2.10 QoS 优化

QoS 优化的主要目标是提供给用户高吞吐量和低时延。移动运营商面临异构的 QoS 实施。这里引入如下概念：用户优先（著名的金银铜用户定义）或服务优先，以保证比特率承载者或者包承载者的优先性，甚至资源的扩大。可以利用 SON 功能来优化 QoS 相关参数。这种工作通常是人工完成的，且是依据专家经验知识由专家完成的，很少有例外的错误案例。

3.2.3 3GPP 的 SON 用例

NGMN 定义的 SON 用例中，并非全部用例对相应功能的标准化都有直接影响。

一般来说，某些功能需要依靠不同供应商提供的网络设备间的信息交互实现，且如果这些交互的信息是特定的、清晰的和非设备商独有的，则这种功能需要进行标准化。这样即使在不同厂商设备之间，也可以保证 SON 功能的互操作性。另外，针对厂商特点的特定解决方案也可以考虑。然而，对于某些特定厂商的 SON 功能，OAM 系统需要以多设备商的方式对其进行控制，此时 SON 控制需要进行标准化，并制定一定政策法规和监管目标。

3GPP 早在 2008 年就启动了 SON 的标准化进程，随后 NGMN 提出 SON 用例并进行研究，并保持跟进。根据不同的职责，工作分为三个工作组（更多 3GPP 架构、LTE 标准及时间进程，参见 2.1 节）：RAN2、RAN3 和 SA5。

RAN2 中只强调一种用例：最小化路测。在 RAN3 中，解决的用例在 3GPP TR36.902（2011）技术报告集中提出，它们是：

1）覆盖和容量优化（CCO）；
2）节能（ES）；
3）干扰抑制；
4）PCI 自动配置；
5）移动鲁棒性优化（MRO）；
6）移动负载均衡（MLB）；
7）随机接入信道（RACH）优化；
8）自动邻区关联（ANR）功能；
9）小区内干扰协调（ICIC）。

可以将大多数 RAN2 和 RAN3 用例很容易地映射到 NGMN 操作用例上：MRO 强调切换优化；RACH 优化是共信道优化的一个实例；CCO 对应小区中断补偿情况下无法采取快速修复动作那一部分。PCI 自动配置是在 NGMN 用例定义之前最早引入的用例之一，因此它强调自动部署中更普遍的需要。3GPP 中两个干扰相关的用例尽管比 CCO 用例更晚出现，但仍有类似结论。RAN3 中的工作则进入到不同的阶段：当前认为一些用例的讨论已经结束（RACH 优化或者 ANR），一些用例正在进行增强型研究（如 MLB、MRO 和节能）以及另外一些用例暂缓研究或者搁置一边（干扰减少）。

CCO 发展经历了一个艰难的过程：启动研究之后搁置，重新启动，后来又超出 RAN3 的研究范围。在 3GPP 不同的版本中，RAN2 和 RAN3 对 SON 相关的研究历程在图 3.6 中展现出来。

类似地，运维用例也指导了 SA5 中的相关工作。第一步是在 3GPP 目标模型中定义了 ANR 功能配置参数［称为 NRM（网络资源模型）］，并定义如何在 IRP（集成参考节点）接口中进行自配置（3GPP TS32.50x，2011）以及完成自动软件管理工作（3GPP TS32.53x，2011）。IRP 接口定义了特定功能的运维和通告。图 3.7 中简要总结了不同 3GPP 版本中 SA5 的相关工作。

接下来，自配置中加入了自动无线配置功能（ARCF）。ARCF 考虑了网元设备的自配置中最新的无线网络环境，这些网元设备通常添加在无线网络中。

RAN2和RAN3研究

自配置　R8

- 即插即用,ANR:
  - 自动PCI配置、新邻区检测、X2建立

LTE中自优化　R9

- 移动鲁棒性优化（MRO）:
  - 检测无线链路失效（RLF），上报UE测量的可能的RLF值
- 负载均衡(MLB):
  - 上报负载和混合容量（包括内部-RAT),HO协商
- 节能:
  - LTE状态上报和叫醒请求
- RACH优化:
  - 上报来自UE的RACH统计数字，并与PRACH交换配置

多种无线接入技术和最小路测技术　R10

- 覆盖和容量优化（CCO）:
  - 当前集中在覆盖问题的检测上
- MRO和MLB增强:
  - 内部-RAT和负载/容量增强
  - 支持重新建立过程
  - 包括家庭/宏小区交互的考虑
- 节能研究:
  - RAT内节能
  - LTE间解决方案增强
    如与覆盖优化相结合
- 最小化路测（MDT）:
  - 主要集中在覆盖问题上
  - 瞬时和非实时报告
  - 给予RRC信令和RRM事件流以及位置信息
- 3G中的ANR
  - 研究3G中更新小区关系表的方式
    (RAT内部和UTRAN间)

图 3.6　不同 3GPP 版本的 RAN2 和 RAN3 中 SON 的相关研究

SA5研究

R8

- ANR:
  - ANR目标模型
- 自配置:
  - 自配置的接口和数据模型
  - 预定义节点停等概率
- 自动软件管理:
  - 下载、设置、激活
  - 基于和自配置相同的框架

R9

- 自动无线配置功能:
  - 利用预规划的或接近实时的无线配置数据
- 自优化：原理、HOO、LBO:
  - 基于管理的目标和政策目标模型
  - 切换优化目标定义
  - 负载均衡优化目标定义
  - 监管目标测量定义

R10

- 节能研究:
  - TR32.826节能管理原理
- 节能工作组:
  - 将具有新的节能状态属性的目标加载到目标小区上
  - 在小区和邻区配置负载门限，以设置离开/进入进入节能状态
  - 功能对小区不产生影响的可能性定义
- RACH优化:
  - 基于获得概率或延迟概率的目标
- 小区中断补偿（COC）:
  - 功能对小区不产生影响的可能性定义
  - 管理COC目标模型
- SON冲突解决:
  - 处理自X功能（依然打开）
- MDT最小化路测:
  - 重用跟踪实体

图 3.7　不同 3GPP 版本中 SA5 相关工作介绍

2009 年，SA5 中就自优化中基本的管理准则达成一致，即目标和政策控制优化（3GPP TS32.52x，2011）。目标涵盖了实现监控目的的新的测量工具，并对 HOO（切换优化）和 LBO（负载均衡优化）给出了定义。

在 2010 年和 2011 年最新的 SA5 工作中定义了更多目标（RACH 优化），并把 NRM 设备加入到节能控制和部分小区中断补偿中来，扩展跟踪实体以支撑自动路测，并解决冲突目标问题。

3.3 SON 基础

自组织是一个过程，在此过程中系统的自发组织（限制、冗余）操作增加，也就是说这种增加并不受环境或外界或者外部系统的控制（Heylighen，2009）。自组织原理的研究已经持续数十年的时间，在物理学方面［磁体（Ising，1925 年）、晶体结构］或者生物学方面［群体智能（bird swarm intelligence）］都有涉及。在传统的（无线）网络中，自组织原理被应用在 ad hoc/mesh 网络的研究中，这些网络的特点是网络节点非协作性部署，并且没有专门的网络运营组织进行监管。然而在 LTE 这种基础设施网络，受到特定的网络运营商协调部署。根据上述定义，可以认为 LTE 受到外网来组织系统本身。事实上，现今的运维支撑系统（OSS）具备这种组织能力，这是因为 OSS 可以获得控制系统的所有信息。举例说，需要的站址和规划覆盖范围，以及预操作邻区关系都可以计算出来，这些参数反过来又给每个 NE 邻区关系赋值（参见 4.2.3 节），因此理论上说，这种系统并不需要自组织操作（ANR 用例可以建立一个分布式的、动态的、自动的邻区管理建立功能）。

然而正如 3.1 节所述，充满挑战（参见 1.1 节）的 SON 的设想由当前应用趋势所激发，这使得自组织原理在基础设施网络也充满吸引力。

1）整个 OSS 系统复杂度增加（根据上述定义的外部系统）：在 OSS 中，尽管可以获得用来组织系统的数据，但该数据可能不是在正确的时间和正确的位置（子系统）。

2）更多的小区增加基础设施网络的复杂度（参见 2.1.8.5 节）：这样的基础设施需要以更自动的方式管理以克服 OSS 扩展性的限制。

3）共享基础设施网络的需要：因此在网络运维中不只包括一个组织。

和上述原理类似，在最近十年中，业界对无线移动网络面临的挑战做出了很多努力，主要集中在以下 3 个方面：

1）功能建立在不变的 NE 和 OAM 系统上，而不是把自动解决方案直接放在网络和 OAM 系统中。尽管把新系统加入现存网络中，可以达到很好的自动化程度，但是旧系统和新系统的交互存在问题（如果通过运行这样的方案产生很大的开销的话，自动化带来整体的系统性能提升则是微乎其微的）。因此，SON 系统的关键特征是分别把相应功能实体从网络规划移动到 OAM 系统，从 OAM 系统移动到 NE 的功能。

2）只强调孤立系统（如只考虑纠错），而并未把不同的网络管理解决方案综合在一个系统中。事实上，在 NGMN/3GPP 中（参见 3.2 节），SON 用作自配置、自优

化、自愈的综合方案。

3）单供应商解决方案。

相对于集中式而言，分布式特征和自组织的概念相关。然而，从外部系统和运维人员的角度而言，SON 系统可以看作完全集中式的，并仍满足上述定义。实际上从概念上说，这意味着包含 SON 功能的集中式 OAM 系统是从整体的 OSS 系统中分离出来（外部系统），并可以认为是自组织系统的一个组成部分。

随后，我们介绍两种关键的技术领域（控制工程和自动计算），这些领域可以看作 SON 的基础。当然，有很多技术领域和技术手段与 SON 或多或少都有关联（这会在本书后续章节适当的部分予以介绍）。

更进一步，现有的针对 SON 的研究简要介绍如下。

3.3.1　控制工程：反馈环

控制理论是当外部、内部条件发生改变时，为达到期望的状态，对系统和机制的数学分析。

图 3.8 描述了在移动网络中，SON 与控制工程中经典的反馈环对应图。移动网络中系统输出参数主要向用户提供的覆盖范围和容量，包括所提供服务的可用性和可靠性。粗略地讲，这些参数由大量网络性能数据得到，可以通过个人网元设备测量。

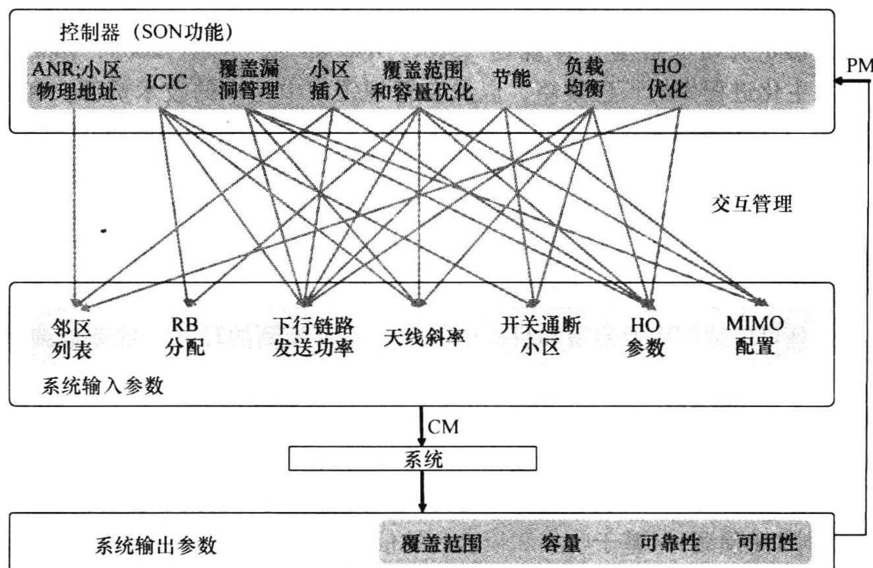


图 3.8　从控制工程的理论看 SON 系统

随后，系统性能数据就对应 SON 功能的控制器使用，并被设置成系统输入参数。从图中可以看出，大多数系统输入参数和多个 SON 功能相互对应，同时单个 SON 功能可能影响不止一个输入参数，因此需要控制器之间的交互处理。

系统输入参数施加到系统中后，会产生系统输出。此处，同样地，单个输入参数可能影响多个输出参数（如功率影响覆盖范围和容量）。同时，多个输入参数可能影

响相同的输出参数（如功率和倾斜度影响覆盖范围）。

由于系统输出参数和控制器输入的依赖性，并不能直接利用控制理论，也不能对其进行足够详细的分析描述，因此仿真主要用于推导配置变化（CM）对控制器的输入值（PM 数据）的影响。

另外，因为没有简单的测量输出（PM 数据），传统的控制器设计不能应用到系统输出（覆盖范围）关系上（另外，有些相互影响的不同控制器可以并行操作）。

3.3.2　自主计算和自主管理

3.3.2.1　自主计算

自主计算描述了实现最小化人为干预的自管理计算系统的一种方法。这个术语来自于人体自主神经系统，无需认知或意识参与就可以控制关键的功能。自主计算的设想描述了在数据计算过程中，从以科技为中心到以数据和业务为中心的根本迁移。本书所说的“自主”并不等同于传统意义上的“自动”，因为一个自动化系统可能仅仅强调网元设备在某一时间分配给一固定的任务。自主系统则超出了这种定义，因为自主系统是在政策和法规驱动下的高级别业务和质量的指导下进行的，它的目的是独立自我实现功能，进行配置和再配置。它们并不一定包含一个单独的、私有的解决方案，而是不同技术和不同设备的相互协作。

在最近几年，自主计算领域开发出一系列的需求和建构，不同规划也相应启动。与此同时，IBM 公司的自主计算规划（ACI，Kephart 和 Chess，2003；IBM，n. d.）可以看作自主化进程中的长期策略，以及自管理领域中基本的技术资源。和 IBM 公司的 ACI 类似，IT 网络系统管理的主要巨头 Sun N1 架构平台则由数据中心、网格计算、服务分割系统等实现。同时，惠普公司也基于自主原理开发了自适应企业战略，也就是 HP 达尔文相关架构，旨在和 IT 基础设施相互联系。然而，HP 达尔文可以看作遵循自主原理来设计 IT 系统的一组准则。

自主计算的设想是旨在开发智能和开放的系统，这种系统可以在最小的人为干预下运行，并且可以适应商业政策和目标中变化及不可预测的环境，持续地调整自身，以从故障中自我保护和恢复，并准备好资源以便高效处理工作负担。

考虑向自主系统的演进历程，可以定义不同的级别：

1）级别 1（初级）：所有系统设备单独管理的人工计算。

2）级别 2（管理）：系统管理技术允许从不同系统设备收集和整合信息。

3）级别 3（预测）：基于收集和聚合到的信息，推荐操作采用模式识别技术，这些操作行为由人工批准执行。

4）级别 4（自适应）：基于收集和聚合到的信息，系统自动采取措施，并通过手动将实际性能匹配 SLA 来控制。

5）级别 5（自动化）：系统完全集成，基于商业准则和政策动态管理。

3.3.2.2　自主管理

尤其在通信网络领域中，自主管理通常和自主计算同步使用。自主管理集中在下列领域：

1）设置和部署技术和过程。

2）通用系统管理：单点模式的管理。

3）问题决定：问题报告的统一标准格式。

4）复杂度分析：也就是运用决策树、贝叶斯判决准则或者规则引擎等知识，来支持分析和规划操作。

5）基于管理的政策：制订通用政策以决定对事件流的预期配置和反应。

6）自动控制环。

7）优化能力：额外的信息（如当前性能和使用信息）需要反馈给自动控制环。

如图 3.9 所示，自主管理周期实现控制循环，就是通常所说的 MAPE（监管—分析—规划—执行）循环，据此可以实现纠正或优化的操作。在控制环中心描述的知识基础支撑事件流分析，这些事件流来自传感器，并决定和规划相应合适操作的执行。

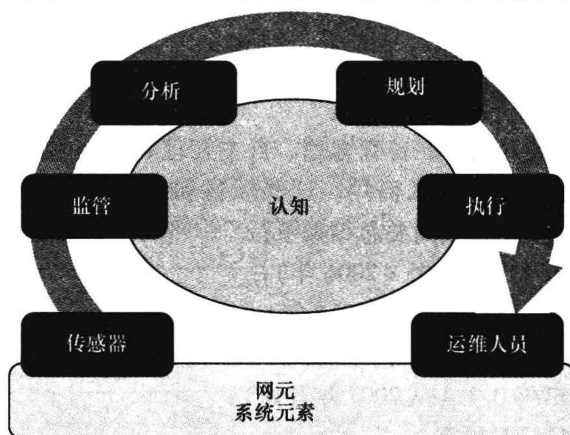


图 3.9　自主周期

自主管理可以划分为四个主要领域，如图 3.10 所示，即自配置、自优化、自愈和自保护。

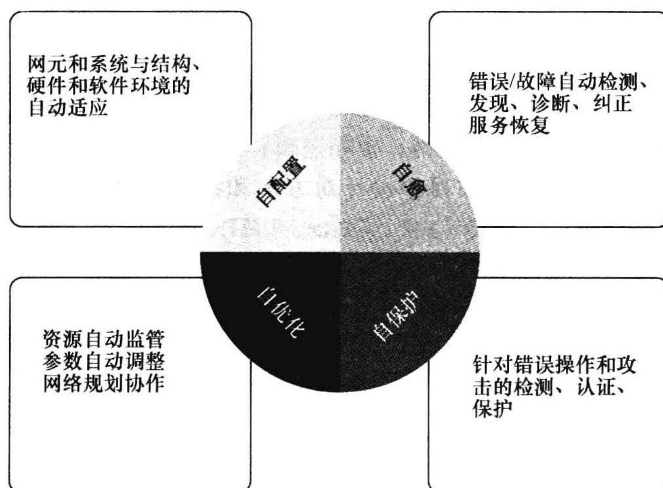


图 3.10　自管理域

1）自配置：外部环境发生变化时，自配置组件通过适应这种改变，可以增加系统的响应能力。系统可以增加以及配置新的装置、额外的网元以及运行期间发布的新的可用的软件版本。这种自动化过程的关键在于使得人为参与最小化。

2）自优化：即使在现有资源和需求频繁变化的情况下，自优化组件也可以充分利用这些资源。一个自优化系统必须持续地监管和调谐系统组件、网元和子系统。

3）自愈：在发现、分析和执行系统中断后，自愈系统可以消除这些系统损毁或中断情况，进而提高业务弹性。系统识别并孤立出错的组件，将其离线处理，进行修理或者替换，随后将功能正常的设备返回到网络中。自主系统需要设计一定程度的冗余度，这样设置的好处是可以使自愈过程对用户来说完全透明化。

4）自保护：自保护组件预先保护数据，以防侵入和干扰。这包括当用户通过一组企业获取资源时，对其进行鉴权管理。自保护也包括监管那些已获取资源的用户、对未认证的侵入采取上报和回应的措施。

3.3.3 SON 研究项目

从 2004 年/2005 年开始，在自我管理、自主管理和 SON 领域，已经有很多公布的研究项目，其中部分已经投入商用。这些项目和移动网络 SON 有着明确的关系（至少在一些工作组中），将其简要总结如下：

1）CELTIC GANDALF（2005 ~ 2006 年）；

2）EU FP7 SOCRATES（2008 ~ 2011 年）；

3）EU FP7 E^3（2008 ~ 2009 年）；

4）COST 2100 SWG 3.1（从 2007 年开始）。

3.3.3.1 CELTIC GANDALF

在欧洲研究开发工程 Celtic 中，Gandalf（2005 ~ 2006 年）项目研究探索了异构移动网络（主要是 GSM、UMTS、WLAN）中自动管理任务的潜能。因此，Gandalf 集中对无线资源管理问题进行研究，包括演进的和联合的 RRM（ARRM，JRRM），在纠错过程中完成自动协调和诊断。针对允许接入、负载控制以及移动性问题（如垂直切换），该项目提出并设计 ARRM 和 JRRM 算法。

针对管理任务的自动化，Gandalf 项目中使用的方法基于以下人工智能和优化方式：针对自动故障重启的贝叶斯网络；模糊逻辑；增强学习；Q 学习以及自调整过程中的多主体优化算法。Gandalf 项目中设计对方法和技术的研究、测试、验证，主要由下面两种测试平台执行：包括 GSM、GPRS、UMTS 和 WLAN 子系统在内的多系统动态仿真器；对应 WLAN 和 UMTS 子系统的多系统测验床。对自动纠错的研究中，主要使用实际网络测量数据（运行维护中心的 KPI 数据）。

取得的主要成果如下：

1）在 UMTS - WLAN 网络中，对基于接入控制的统计用户负载和基于垂直切换的统计用户负载设计了 ARRM 和 JRRM 算法。

2）设计出基于带有增强学习方式自调整算法的模糊逻辑，这种模糊逻辑能改变 RRM 参数使其适应网络流量的变化；在 UMTS 网络中应用一种资源分配自调整算法

以及在流量均衡场景中通过 UMTS、GSM - UMTS 和 UMTS - WLAN 网络中的自动调整参数来加以研究。

3）自动网络分析，针对 2G 系统的现存的贝叶斯网络模型应用在 UMTS 网络自动差错原因分析，包括自动建模学习、分段和干扰算法。

Gandalf 项目成果影响了其他研究项目（如 EU FP7 SOCRATES 和 E^3 项目）。

3.3.3.2　EU FP7 SOCRATES 项目

SOCRATES（无线网络中自优化和自配置 www.fp7 - socrates.eu，2008 年 1 月 ~ 2011 年 3 月）项目针对特定 LTE 自组织用例设计了解决方案。该项目遵循 3G 人工配置的自底向上、从细节到整体的方法，以差错和性能管理解决作为起点，并以短到中期将项目研究成果应用到运维网络的时间线为目标进行。

对于从 24 个初始 SON 用例描述中选择出的 8 个用例来说，它们的解决观念和算法通过仿真验证，与之前定义的需求和评价准则相一致。用例一部分产生于 NGMN 论坛的调研，另一部分来源于 GANDALF 和 CQST2100 项目的成果和相关定义。最终选择的用例如下：

1）负载均衡优化（LBO）；

2）切换参数优化（HPC）；

3）家庭基站（HeNB）参数优化；

4）接入控制（AC）参数优化；

5）包调度（PS）参数优化；

6）干扰协调优化（ICO）；

7）小区中断管理（COM，自愈）；

8）AGP 初始参数的自动产生（自配置）。

更进一步，项目中还分析了一系列用例对，这些用例对与修改的配置参数密切相关。尤其是切换相关的配置参数被多个用例使用，如切换补偿。可以证明，作为单个算法的输出，一些用例对的同时并发操作可能对网络整体质量和性能产生意外的影响，也就是说，修改的配置参数可能会发生冲突。这些用例对的仿真结果表明，相应算法的集成可以显著地减少潜在的冲突，继而减弱对系统质量影响。该项目也设计出由不同的 SON 功能协调和集成后得到的功能架构，通过合理设置单个 SON 功能的目标和政策，达到避免冲突的目的，另一方面，能检测和解决由于不同 SON 功能同时操作引起的冲突。

SOCRATES 项目的研究成果对 NGMN 的工作和 3GPP 标准化都产生了一定影响，因此该项目也向这些组织慢慢渗透。更进一步来说，由于在移动无线 SON 研究组中，SOCRATES 项目有很高的可见性，研究成果和发现被大量出版物引用。

3.3.3.3　EU FP7 E^3 项目

端到端效率项目（E^3，https：//ict - e3.eu/，2008 年 1 月 ~2009 年 12 月）的主要目标是把无线系统基础设施转变成综合的、可衡量的超 3G 认知系统架构。E^3 的一个目标是增加无线网络运行的效率，建立具有认知（自学习）能力的分布式自组织原理。研究自动实体和算法的工作组 4 则强调，在认知无线网络环境中可以达到该目标。

E^3 项目引入“认知管理和控制”的架构概念作为自动管理增强手段，并通过包含自学习能力以提高管理系统中自优化引擎。这种自学习能力可以进一步改善政策、情景采集和管理系统的配置文件。与苏格拉底项目不同的是，E^3 遵循自上而下的方式，从高级的概念和架构开始，随后把这种架构应用在选定的 SON 用例中。然而，两个项目都考虑用例的选择操作。考虑到成果在运维系统中的应用及对成果商业方面和应用影响的分析，分析这种 E^3 项目需要中期到长期的时间线。

E^3 项目设计了一系列针对 SON 问题的自动化和协作化的算法，这些算法在原型和示范环境中得到证实：

1）频谱共享和机会频谱接入的自动算法：在认知无线环境中的频谱选择应用。

2）在自动网元设备中采用基于 self - X 原理和重配协议的自动算法。

3）无线接入网络优化的协作算法，如中断补偿、小区干扰协调、网络分段重新配置的认知。

4）利用认知技术设计的动态频谱管理协作算法，包括频谱感知和信息提供机制。

5）认知技术增强的联合无线资源管理（JRRM）协作算法。

6）移动基站管理协作算法。

7）作为自动的和协作算法使能器，对认知导频信道（CPC）定义，如考虑信息结构、比特率需求、mesh 优化。

和苏格拉底项目一样，E^3 的主要影响也通过参加相应的合作组体现，项目的相应成果也渗透在 3GPP 标准组织和 NGMN 论坛中。

3.3.3.4 COST 2100 SWG 3.1

COST 是科学与技术研究领域中一个欧洲的政府内的组织，全称是欧委会科技合作委员会（http：//www.cost2100.org）。COST2100 工作组致力于普及移动和周围的无线通信，属于 ICT 领域。这个工作组主要解决在移动无线通信领域中出现的基本问题。子工作组 SWG3.1 致力于移动无线网络优化方面，并特别关注优化过程中的输入数据，目的是通过测量从运行系统中获得的数据，来替代从现有的基于模拟、预测的优化工具中人工产生的数据（如 OAM 系统、网元和探测器/驱动测试工具）。SWG3.1 的工作包括：

1）网络性能设计准则，测量数据的定义、获取、滤波、标准化、相关度、分组和分离。

2）优化参数定义和选取参数相关的计数器和质量指示符。

3）网络建模，通过测量数据、优化方法设计、算法应用来实现模型调整。

4）基于优化方法的测量数据和仿真数据对比，优化方法包括：参考环境定义、场地测试与现网实际测试。

在 SON 和移动网络优化领域，COST 2100 SWG3.1 与其他的研究项目组（如 GANDALF 和 SOCRATES）都有合作。由于 COST 2100 实际上是一个框架，并不是基金支持的研究项目，因此研究成果只供参与组织利用。

3.4 架构

本部分将讨论SON系统架构，还特别考虑在OAM体系何处设置SON功能，考虑融合了特定用例和特定系统的准则。

图3.11描述了2.1.9节中介绍的3GPP OAM架构。网元设备（如eNB）由其（特定设备商的）域管理器管理。不同的设备商域可以在网络管理级别（NM）上，以一个统一的方式由北向接口（Itf－N）管理。在图3.11中可以看到加入的SON功能有：

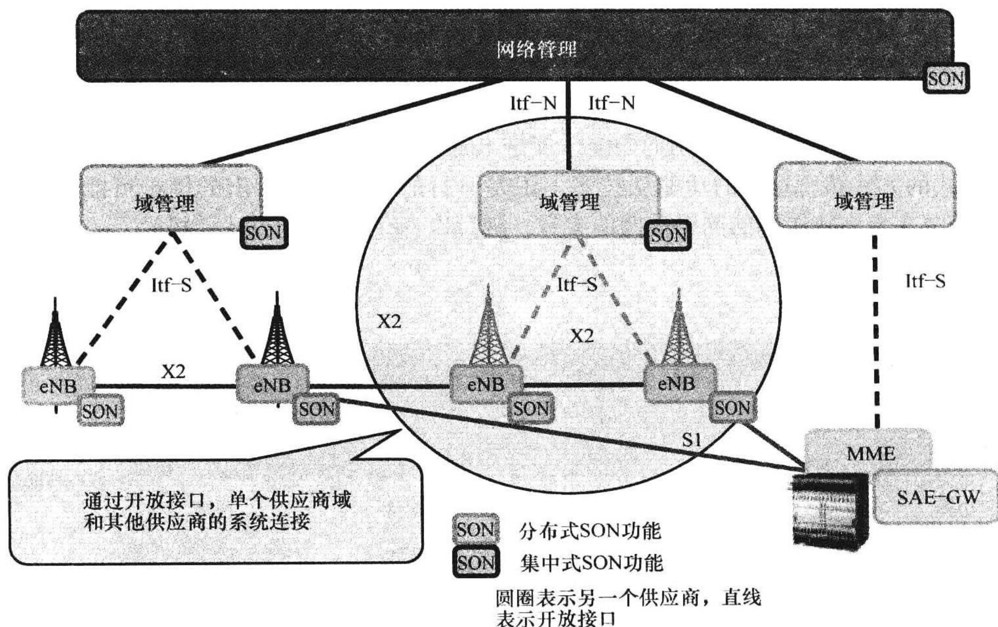


图3.11 3GPP OAM架构中SON功能位置
（Sanneck、Bouwen和Troch，2010年，经IEEEc 2010允许复制）

1）NM级别：集中式SON（用标准的或者私有接口）。

2）DM级别：集中式SON（用私有接口）。

3）NE级别：

① 分布式SON（用标准的或者私有接口）。

② 本地SON（不依靠其他NE，因此对接口没有要求）。

不同级别的SON实体综合在一个系统中就称作混合SON系统。单个SON功能可以被混合在不同级别执行操作的不同功能组件中（如ANR功能，参见4.2.3节）。

应该注意到SON功能本身是由图3.11描述的OAM架构所管理的实体。然而，此处的管理涉及设定目标，并以较高级别配置SON功能并监管SON功能的输出成果，而不是直接改变低级的配置方式和监管低级SON实体性能指示符（参见3.2.3节中

3GPP SA5 相关部分）。

很明显，驱动 SON 功能的数据（KPI 和告警）在单个 NE 端产生。这意味着对于分布式 SON 方式，信息（需要重新拿配置的数据）需要在 NE 之间交换。在一个分布式 SON 实现方法中，一手的数据需要从 NE 转移到 DM/NM 级别中。运行 SON 功能后，要求的重配置方式需要轮流地运载到相关的 NE 上。

在下面的部分中，各个级别处放置 SON 实体的选择准则都将给予讨论。

3.4.1　用例相关准则

1. 空域范围

图 3.12 描述了 SON 功能范围（从个别小区到整个网络）与其执行位置之间的关系（NE/DM/NM 级别）。一方面来说，NM 级别在网络范围（包括多供应商域）上设置 SON 功能是很自然的（如自动配置网络参数，该参数对网络中所有的 NE 来说都相同），这是因为位于这个级别的功能，理论上是由数据驱动的。另一方面，采用完全分布式的方式执行这样的功能从技术上说是可行的（如上面给出的例子可能意味着 NE 恢复来自 NM 级别的网络范围的参数，随后以 NE 到 NE 的方式传播）。

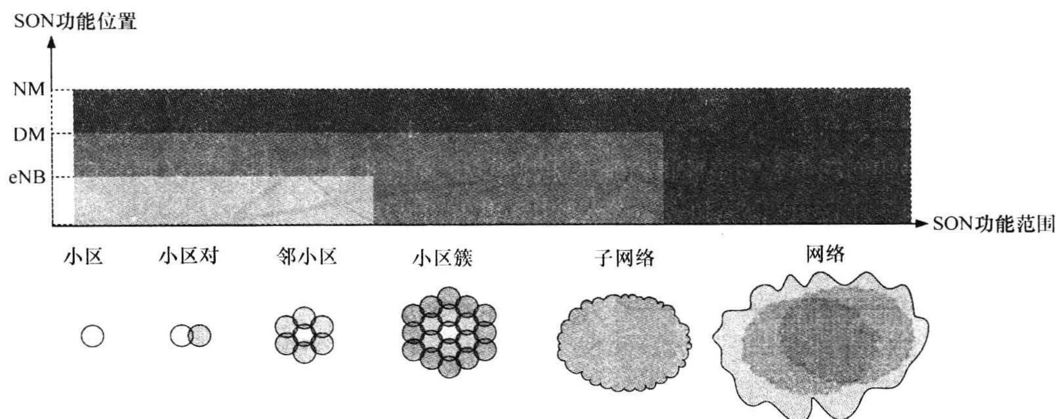


图 3.12　SON 功能空域范围对比 SON 功能执行位置

对于这种有范围限制（如一对小区内）的功能实体来说，一方面，由于其是由两个 NE 可获取数据驱动，因此这种功能实体很自然的可以在 NE 上执行；另一方面，在 DM/NM 级别上，没有基础技术断点执行它。

可以注意到，本书其余章节讨论的关键 SON 功能主要是小区簇级别范围内。

2. 定时要求

SON 功能时间间隔是特定的，在此时间内功能实体获取数据，请求和执行 NE 的重新配置（在 9.1 节 SON 实体交互内容中有详细介绍）。这些实体的时间间隔（从分钟到天不等），一般来说大于 RRM 实体（参见 5.6 节），小于传统网络优化功能。与传统的 OAM 功能的位置选择相比，SON 功能的创新性在于这些时间间隔位于两个极点的中间，因此 SON 功能应该保留在架构中，而不是直接实现。

可以看到，SON功能要求相对频繁的数据获取和操作，并且分布更加分散，然而对于很少执行的功能则应该采用集中式铺设。与上面提到的空域范围考虑相类似，这仅是粗略的指导方针。当系统数据获取、转移、执行/判决的循环操作足够快，以及重新配置要求的转移操作也十分迅速时，同时在离散系统实例化时留有足够扩展接口，任何功能都可以以集中式的方式实施和测量（这与下面提到的系统级准则有关系）。

3. 标准化和企业私有参数对比

在传统的蜂窝网络中，有数以万计的网元设备，这就导致大量的参数需要维护。尽管大多数参数可以设置成默认或设备商定义的数值，或者可以通过网元设备或者环境特定模板具体赋值，剩余的参数数量仍十分庞大。所以对于一个典型网络来说，即使在日常配置和优化工作中，只需要考虑很少一部分的参数，仍有大量的参数值是日常管理的主要任务。这些参数可以设定为运营商特定值或标准化值，这对选择控制这些参数的SON功能的执行位置有重要意义。

1）标准参数（3GPP、IETF、ATM论坛等）：为了配置标准的外部接口（空中接口，回传线）特性，这些参数已经被标准化，参见4.1节（如VLAN、IP地址）、4.2节（如频带、小区ID号）和第5章（5.1.3节中切换参数）。对所有设备商来说，这些参数有着相同的语义，因此可以独立于特定NE的设备商进行优化和配置。这种参数大约占全部参数的10%~20%（注意，一个无线小区一般有大约500个参数）。在白天网络运行过程中，大多数参数都会有所涉及。

2）呼叫处理中的厂商专用参数：如3GPP并没有标准化设备之间的逻辑，而这些逻辑决定切换操作（对于网元设备之间的切换信息序列已经得到标准化，但为了给供应商提供差别服务和引入增强特征，决定切换的内部逻辑并未标准化，参见5.1节）。所以大多数配置切换判决逻辑参数都是厂商专用的。在大多数情况下，即使语义相似，不同供应商的参数也不能相互转化。因此，在优化这些参数时，不能独立于厂商进行，而应该和其仔细协调。

3）对低级硬件和NE内部特性的厂商专用参数：这些参数通常在试运转时设定，在网元设备生命周期内很难修改。因此，在SON角度并未对其进行深入讨论。

总之，厂商专用参数大约占据所有参数的80%~90%。

4. 数据/处理的数量

和DM/NM级别相比，由于NE级别中建立存储和处理功率的成本相对较高，因此用于处理的NE资源往往是有限的，这促使了集中式实现。另一方面，前面提及的从NE到DM/NM级别的数据转移会消耗OAM带宽并产生时延。具体的系统实例化时，也需考虑网络构建中这些特定用例的限制。

5. 决策制定

基于一些NE输入的集中式决策制定通常是直截了当的，然而分布式决策制定需要仔细计划和控制，以避免传统的分布式系统中并发性问题，如振荡、竞争状态和死锁。另外，分布式决策制定系统在空域范围，类似小区簇内十分高效，但可能无法扩展，比如无法扩展到广域内的任务。

3.4.2 系统级准则

1. 可扩展性

如前所述，SON 功能范围通常最大可以达到小区簇级别，基于此，与集中式不同，分布式系统需要逐个功能进行扩展性分析。另外（对于传统的 OAM 和 SON 功能），对 NE 的数量有一个上限，该值需要在一个集中式管理的 OAM/SON 域内。这意味着，对于有着大量 NE 的场景（参见 2.1.8.5 节），需要引入额外的（DM）级别体系以改善扩展性，然而分布式 SON 方法无需这种额外的操作。

2. 可靠性和可用性

可以看出，集中式 SON 方法可能会出现 DM/NM 级实体单点失效，而分布式方式虽避免了这种缺陷，但具有分布式系统固有的冗余度。当然，当集中式 SON 实体架设在已经具有服务簇备份手段的这样 OAM 实体中时，这种 OAM 系统存在冗余机制可以提高系统可靠性和可用性。

3. 多厂商性能

NE 和 NM 级别都提供基于 3GPP 标准的多厂商统一平台，然而在 DM 级别只有私有融合操作。在 NE 级别（3GPP RAN WG）上 SON 相关的标准起源于紧急呼叫处理标准化，也就是说，数据交换过程中互操作性可以得到保证。然而，这以较长的标准化进程为代价。另一方面，一般认为 SON 功能中 NM 级别的标准化进程（和 OAM 标准化大体相似）进展很快，给特定厂商交互留了更多空间。一般来说，SON 功能内部的互操作算法并不直接包含在标准当中，参见上述“标准以及私有参数部分”。

4. 管理/可控性

在初始 SON 部署阶段（参见 3.6 节运行挑战部分），运营商希望对系统施以更多的控制，并严密监管 SON 功能的动态。新的运维工作流程（参见 3.2 节和 3.6 节部分）需要通过联合 SON 功能和现有的工作流实现。

集中式方法可以利用这两种需求，这是因为所有的 SON 相关的数据和自动 SON 决策制定需要和功能协同定位，运营商据此进行控制和监管。然而在分布式方式中，需要专门额外配置 SON 功能（如需要从 NE 到 OAM 传输额外的数据以满足运营商的控制和监管要求，继而保证分布式配置对应运营政策变化的连续性）。

5. 可扩展性

和之前的观点类似，对现存的 SON 实体的升级操作以及可以增加新的 SON 功能的单一入口点（类似集中式结构中）对 SON 系统本身可运维性十分有利。

6. 系统遗产和生命周期

从 RRM 和网络优化工具区域，可以得到 SON 功能演进路径，如果一个现存的优化工具包括在一系列 SON 功能中，最自然的架构选择就是集中式 SON。而如果 RRM 功能作为 SON 功能的基础服务，那应该选择分布式 SON。

考虑到系统生命周期，分布式和集中式存在的差别如下：在传统的 LTE 部署中，基本的网络配置和优化可以足够推动个体分布式 SON 功能，要求较少的甚至不要求集中式 OAM 系统的支撑。在后续的生命周期中，要求全部的优化和差错减缓功能，

OAM 系统升级以便为集中式 SON 功能提供支持，因此此时包括域和网络范围的运维工作流程。

总之，总结上述观点，选择 SON 功能执行位置是至关重要的，因此 SON 结构主要基于每个用例情况。对于相应的 SON 功能，下面的内容将讨论体系架构中功能实现的位置选择（4.2.4 节动态无线配置功能、5.1.5.2 节移动鲁棒性优化、5.4 节覆盖范围和容量优化）。

另外正如前面所强调的，对于一系列 SON 功能，也需要考虑系统级的运维限制，这部分内容将在第 9 章（SON 运行）进一步阐述。

3.5 商业价值

本节将概述自组织网络（Self - Organising Networks，SON）的商业影响，主要分析宏 eNB 的部署。由于 SON 所获得的收益很大程度上取决于运营商和部署方案的特定情况，因此不可能对不同用例下收益统一量化。

所以，本节从 3.5.1 节开始概述 eNB 的一般经济模型。3.5.2 节中叙述不同的 SON 收益模型。在此基础上，3.5.3 节 ~3.5.5 节对所选 SON 特征的预期收益给出更加详细的分析。

3.5.1 eNB 选址的经济学

对于移动运营商来说，建设移动网络的费用不仅仅来自于单纯购买单个网络设备的费用。因此，在电信基础设施环境下，总拥有成本（Total Cost of Ownership，TCO）概念得到普遍认可。TCO 包含了单一计算的技术解决方案（一个 eNB 的情况下）在整个生命周期中的所有费用。TCO 能够计算三个部分的总和，即资本支出（CAPital EXpenditures，CAPEX）、实施支出（IMPlementational EXpenditures，IMPEX）以及运维支出（OPerational EXpenditures，OPEX）。

成本组成的一个额外部分是其初始成本，比如设备本身或用来安放设备的站址，这些都是一笔支出。

本节后续部分将对 CAPEX、IMPEX 以及 OPEX 的组成做出更加详细的叙述。之后，将会解释基站选址的潜在收益，据此可以获得对 eNB 经济状况的整体了解。

3.5.1.1 CAPEX

设备相关的 CAPEX 仅包括购买费用，即网络运营商支付给设备制造商的费用。对于 LTE 基站选址而言，所需的设备包括 eNB、天线以及像电缆和安装材料等辅助材料。

站址相关的 CAPEX 包括获得许可的费用和包括人力建设、计划、工程管理等在内的站址建设费用。对于基站选址而言，这些费用十分重要，如有时需要搭建一个专用塔或是安装一个屋顶。

3.5.1.2 IMPEX

IMPEX 包括安装设备所必需的所有费用。然而，在支出模型中对铺设的处理是

模棱两可的。

在某些不太正式的情况下，IMPEX 由于其潜在的操作性有时也被称为一次性 OPEX，其主要包括服务人员的人力工作。

另一方面，根据财政规则，应将所谓的财产、厂房和设备（即有形资产，可能会在会计流之外产生正向收益流）的传输和铺设的费用看作资本支出（IASB，2003）。需要注意的是，不论是运营商自己执行这些任务还是从设备提供方这样的第三方购买，该制度都是独立的。因此，可以把 IMPEX 看作 CAPEX 的一部分。

由于超出了本书的范围，本章后续内容并未进一步说明这些与会计规则有关的问题和资产负债表的正式协议，但本章描述了属于 IMPEX 的不同项目。

IMPEX 包括把设备运送到站址传输费用，设备的物理安装及建立电力供应、天线、回程链路连接的费用。上述费用与基站选址及物理特性有关。

此外，IMPEX 也包括纯粹的设备相关成本，即设备初始配置工作的成本，俗称试运转。还有无线网络参数的初始规划（如切换参数）和相应验证（即通过路测方式）的费用也可看作 IMPEX 的一部分。然而，当上述操作在网络正常运行期间反复执行时，应认为其属于 OPEX 范畴。

3.5.1.3　OPEX

与基站选址相关的运行成本包括地皮租金，或许还包括室内维护的支出，如空调系统费用。与设备相关的 OPEX 包括电费、运输费用和运维（operations and maintenance，O&M）费用。电费根据设备能耗和电价来计算，用作基站回程的租用线会产生传输费用。需要注意的是，在自建移动回程场景中（如通过微波射频），建造费用是运营商 CAPEX 的一部分，而随后的运行回程网络的费用则是 OPEX 的一部分。然而在本研究范围内，重点考虑 LTE SON 效益的研究，与该区别没有直接关系。

O&M 费用包括所有维护和运营网络所必需的操作。为进一步精简 O&M，一方面可以把它分成现场维修工作，另一方面可以分成在网络运营中心内执行的网络运营工作。现场维修工作包括所有操作，如替换故障设备或重新调整设备器械，这需要派人到受影响的基站考察，网络运营则包括网络优化、故障管理和性能管理。作为一个经验法则，每 100 个基站需要分配一个人分别去做现场维修和网络运营工作。由于油价的上涨，去基站的来回燃料费用和路测的燃料费用在总支出里的比重越来越大。

3.5.1.4　TCO 分解

尽管基站选址的 TCO 与许多的环境密切相关，不过这里会给出一些大概的数据，这些数据是由欧洲中部的基站得到的。

CAPEX 和 IMPEX 是一次性支出，而 OPEX 需要重复支出，因此要把设备寿命期的花费累加起来。较好的开始是把 TCO 分析建立在一个为期五年的时间上，五年是电信设备的典型经济寿命期，这样具有现实意义。对类似基站塔或光纤铺设等的投资，则显示出了更长的寿命：多达数十年。因此这些花费应按比例分配。

此外，为获得正规 TCO 持续价值，在寿命之初不存在的现金流需要按适当比率打折，这样就要考虑到所谓的资金时值。由于这里只进行定性分析，打折扣的影响可以被忽略。TCO 大体由 CAPEX 加上 IMPEX 再加上每年 OPEX 的 5 倍组成。

依据该经验法则可以发现，TCO的价值大约是6位数的欧元。与设备相关的CAPEX只占到TCO的很小一部分，大概在20%。即使电费在环境保护方面应受到很高的关注，但由于对TCO的贡献较少，仅占很少的百分比。随着现场维护和网络运营达到同一数量级，总O&M对于TCO的贡献低于10%。同样，与设备相关的IMPEX也只占TCO几个百分点。换句话说，迄今为止提及的所有设备的相关成本总计达整个TCO的30%。剩下的70%与选址成本和运输成本有关。

3.5.1.5 潜在收益

为理解基站选址的经济作用，潜在收益也要考虑。另外，这些数字在各个情况中有所不同，因此此处仅进行少量粗略计算。典型的假设是用一个宏eNB为1000个用户提供服务。如果一个基站站点产生每个月20欧元的每用户平均收入（Average Revenue Per User，ARPU）收益，那么整个寿命中总计超过1百万欧元。幸运的是，潜在收益比总支出要高得多，这就允许运营商支付如客户服务或营销等其他费用并得到一些收益。

另一方面，也可以明显看出SON不仅能减少支出，也能通过如优化容量或增加可用性激发eNB的全部收益潜能，下一节中将给出该内容具体描述。

3.5.2 SON的通用运营模式

本节将概述LTE SON不同运营模式，随后的内容中将介绍其具体用例分析。

很明显，通过增强员工的生产效率或是减少某一具体工作所需员工的数量，SON能够给运营商提供生产效益。而SON所提供重要经济价值的好处可能相对不太明显。

在后续讨论中，预期收益主要由以下3类构成：

1）节省运维和实施开支。

2）减少达到某种网络功能所需的设备数量。

3）增加给定网络的价值。

在之后的内容中将逐一讨论它们。

3.5.2.1 节省运维和实施开支

这类可以进一步分为生产率收益和降低的能源消耗，其中，生产效益来源于O&M中效率的提高，而能耗降低则来源于能源利用率的提高。

1. 生产率收益

SON的目标是将某些过程自动化，以此来完全避免或者说至少可以降低诸如目前采用的人工劳动力或者工具成本等的工作成本。通过比较在传统网络或者SON支持的LTE网络上执行相同的任务，可以计算出其所带来的收益。对于大部分SON任务来说，有很多手动完成相同目标的方法可以接受。遗憾的是，运营商有不同的内部员工模式，不同的过程以及不同的地理因素，这使得即使在传统网络上也很难比较不同运营商的业务开支。尽管如此，这里还是会给出一些通用性的结论。我们已知节余取决于三个因素：某次处理步骤中单次执行所需的工作量或设备量，其值通过SON的自动化而减少，每一个单位工作时间或设备使用开支，最后还有一个用来表示过程执行了多少次的乘法器。这方面的考虑直接引出两个重要结论：首先，过程自动化在

人工成本很高的领域更重要；其次，如果频繁执行上述过程步骤，即使是很小的改进也会累积为很大的进步。反之亦然，如果很少执行该过程，复杂过程的自动化也不会有什么成效。这里的发生率不仅通过重复率（如一年中的发生次数）给出，而且也依赖于一个过程单独执行时实体的数量（如 eNB 的数量或网络管理系统的数量）。

尽管节省人力成本计算在理论上很简单，但实际节余可能不同于这些简单的预测，如也需将任何专业技能水平变化作为因素考虑进去。由于减少工作量带来的花费节省可能通过余下事实补偿，即余下的工作更加复杂，因此需要支付的更高。

2. 能源效率

由于能源价格的增加以及环境气候保护的普遍意识提高，通过网络结构重整减少能量损耗的收益可以明显地衡量出来。

降低上述任何能耗值需要在不损失维持适当服务和覆盖范围水平所必需的射频发送功率的条件下实现。降低移动网络尤其是 eNB 的能量消耗仍需不断研究和开发。更高的频谱效率、能源优化的射频放大器、优化散热和远程无线电头都可以作为此处的实例。

尽管上述取得进展，某些 SON 功能，诸如能量优化或者在要求较低期间关闭暂时不用的 eNB（或是关闭它的一部分），它们的额外改善仍有发展空间。然而精确的节省需要依赖很多因素，如电费、SON 解决方案的技术实现或业务模式的发展，因此预测它非常困难。粗略的估计表明，在 eNB 的整个寿命中，这些节省总计可达 1000 欧元。

3.5.2.2　减少所需设备的数量

SON 的一个目标是自动执行某些操作以便节省人力开销和相关的材料成本。SON 的进一步目标是提供网络优化以减少达到网络性能某一水平时所需的设备数目。最重要的是，在移动网络中，这是所需 eNB 的数量的问题。

可进一步区分覆盖范围和容量驱动场景的区别。第一个场景，对于用最少的 eNB 实现给定区域的覆盖，这是在最初部署阶段最重要的关注点。考虑到预计的流量预测，对于第二个场景，使用最少的 eNB 提供所需的网络容量将长期占主导地位。

当考虑减少 eNB 数量的所得利益时，需注意到 CAPEX 只占了整个 eNB TCO 的一小部分（大概在 10% ~20%）。因此，从运营商角度来看，eNB 数量减少所造成的节省主要是与节能这些额外费用有关，这部分额外费用贡献了 TCO，而不是产生 eNB CAPEX 本身。

应注意到也会有不能减少基站数目的情况存在，如由于覆盖范围的原因使得所有的 eNB 都是必要的。

然而，即使在这种情况下，如果网络信息流通量随后增加，实现容量优化可能允许推迟必要的网络更新。

资金收益主要依赖于技术收益，即依赖于性能提高的程度。因此，收益不能仅通过商业分析来计算，还需要与相应的网络规划和网络标尺操作相结合。

3.5.2.3　增加给定网络的价值

最后，SON 也有助于增加给定网络的价值，或换句话说 SON 可以帮助增加运营

商的收益。这样做一方面是提高了给定网络的覆盖范围和容量。由于通过增加额外eNB也有可能提高性能，关键是通过SON优化的方法避免增加eNB数量。因此，这部分讨论与上述完全类似，此处不再重复。

另一个可能增加网络价值的方法是增加它的有效性，或反之亦然，减少无效时间。在这种情况下，直到第一次商业化运行前的初始阶段都是无效时间，运行中的停机时间和故障周期也是无效时间。

1. 减少第一次运行前的初始时间

第一个方面，减少第一次运行前的初始时间，使运营商产生更早的收益，进一步使其在上市时间的竞争中处于领先地位。至于减少商业化运行前的初始时间，在推出过程中需要提及与SON相关性能的提升，如自动配置或自动邻区关系（Automatic Neighbour Relation，ANR)。除了节省运维开支，这些想法也加速了安装和试运行进程，最重要的是，物理安装一结束就允许商业化运行，与外部网络同步事件无关。

另一方面，迄今为止没有提到的是减少测试时间的可能性。在一个完备的网络试营之前，首先在有限区域铺设新版本，并进行密集测试。测试的一个目标是优化配置参数，这些参数以后可作为默认值。如果参数的优化是以自动化方式执行（如基于一个性能管理数据的自动估算，而不是路测)，测试阶段可以明显缩短。

初始停机时间是典型试运营中最浪费的时期。CAPEX、IMPEX以及一定程度上的OPEX已经产生，但是尚未获得收益。因此，对于运营商和参与设备商来说，减少这期间的花销十分重要。SON有助于减少这段时期直至达到收支平衡。

2. 减少停机时间和故障周期

网络的有效性能通过“自愈”来改进。在停机时间和故障周期中产生很少或不产生收益。除了收益直接损失外，停机时间和故障周期内还降低了用户感知的质量。这增加了掉网率并进一步影响运营商的竞争局面。

“自愈”的本质是花费时间和资源来发现和解决问题，而不是很快得出问题。可以通过尽快记录每网络单元的服务中断计算出这一操作的好处。这样的SON用例的例子有：“小区中断检查和补偿”和“高阶设备的中断补偿”，可参见3.2.2.6节以及第6章。在很多这些情况下，SON不修复原始问题，但会很快察觉出存在问题，在原始问题得到解决之前，重新装配网络以减轻中断的影响，因此可以提高网络的有效性。

可能存在诸如告警相关性、自动纠错或睡眠单元检测这样的自动故障管理。事件管理自动化不仅减少了必要的工作和人力，也缩短了停机时间和故障周期。

上述概述后，下面将对SON的收益进行更详细的讨论。讨论分为三类：安装和规划、网络优化以及故障管理。

3.5.3 安装和规划

关于铺设/安装阶段，SON的主要收益在于规划过程和实际eNB安装这两个过程的简化。

3.5.3.1 网络规划

由于复杂性和特殊化的要求，从 eNB 选址的物理性质出发，完全自动化规划过程不可能实现。运营商的传统网络和运营商及其网络的成熟度是影响着规划进程以及 SON 潜在收益的重要因素。

下一代移动网络（Next Generation Mobile Networks，NGMN）包括一系列应由 SON 来解决用例中的无线规划（NGMN，2008）。然而 NGMN 承认根据任务的性质，SON 不可能随时很快解决它们。因为规划者需考虑很多超出大部分 SON 能力范围的因素，所以实际做无线规划时，选址规划不容易实现自动化。这些因素包括了土地所有权、规划设计、建设拓扑结构和现有地址的附近状况。

具有多个网络基础设施和多个频段网络运营商有必要建立一个选址数据库，以此来指示这些站址的覆盖能力。对于这些运营商来说，可以证明创造一个基于规划方案的 SON 具有成本效益。引进 SON 对现有运营商也是一项挑战，因为他们已经形成了一套牢固的运行结构和过程。通过使过程适用于新的任务，可以最大地提高 SON 的效率。

SON 强调的几个要点是在原始容量规划的基础上自动创建配置数据。

1. 自动配置

在诸如形状因素和电缆铺设等 eNB 物理设计相关的方面，对于即插即用类型安装来说，SON 自动配置的特征是其重要组成部分。安装操作与成本在本质上简化了 eNB 的机械安装和连接，没有必要派专员现场考察或者进行专员远程支持。这种情况下 IMPEX 的节省取决于运营商确切的操作和薪金，通常是每个 eNB 大约 100 欧元。

由于 eNB 软件和所有的配置数据都会在自动配置期间下载到 eNB 上，因此无需提前安装（如在生产期间）。所有 eNB 以相同默认状态离开工厂显著地提高了 eNB 分布的整体逻辑性，并允许短时间内重新排列铺设时间表的优先次序。

2. 自动邻区关系（ANR）

如果自动执行规划和建立相邻区域，相对于手动执行的开支而言，每个 eNB 能节省大约 15 欧元。利用 ANR eNB 在首次上电和自动配置后就可直接用于商用，不再需要特定的外部同步事件，这可能会延迟时间到商用化操作。上市收益的计算很大程度上取决于具体的商业环境，不能一概而论。这种情况下的效益会远远超出 IMPEX 的相关节省。可猜想运营商一个月上市收益的附加收入可能会达到每个 eNB1000 欧元以上。

3.5.4 网络优化

讨论网络优化时需要区分两个方面。首先，自动网络优化的目标是通过提高相关人员的工作效率自动进行现存网络优化。

其次，自优化比当前的手动优化提高了现有设备效率，这样能进一步减少每比特的有效支出。提高网络效率的用例的典型例子是移动负载平衡。

3.5.4.1 自动网络优化

目前网络优化都或多或少是通过手动或用工具来改变网络参数，这样做会影响网络性能。优化参数包括切换参数、邻小区列表或各小区参数。人工网络优化的花费十分巨大，每年每个基站很容易达几百欧元。进一步假设，SON 的引入把运维效率提

高了两倍，每年每个 eNB 200 欧元的价值提供了一个现实可获得的节省的数量级。所谓的路测是指在某一区域通过用带有专用测试设备的车对网络质量进行外部测试，如果能将其避免，那么自动网络优化的潜在节省甚至会更高。路测要求员工和包含复杂的测试设备的车辆，因此这是主要支出因素。根据引入 SON 之前的路测的频率，有可能取得 100 ~ 200 欧元的额外节省。

3.5.4.2　移动负载平衡（Mobility Load Balancing，MLB）

MLB 能使超负载小区把部分负载重新分配到相邻小区上。这样由用户产生的业务负载分配到可用单元上，使网络流通量最大化。这个单元之间内在的连接效率提高了网络平均利用率，并允许推迟附加网络容量的部署。

利用 SON 执行 MLB 的目的不是为了提高员工生产率，而是在很短的时间内达到动态负载平衡，这不能通过任何合理的增加人数来达到。

因此，SON 在用户单元随时间不同而使用不同模式时，即繁忙点出现时间总是不同时，可以使 MLB 的收益达到最大。

像 MLB 这样算法的好处可以提高网络性能，其好处首要取决于实现的性能增益。尽管本节范围并不概述该性能增益，但应注意它可能会对 TCO 和收益产生很大的影响，并且在 eNB 的整个寿命中很容易达到数千欧元。

3.5.5　故障管理

故障管理涵盖了如网络监测、告警处理和故障处理等操作。从运营的角度来看，这些操作可分为远程部分和现场维护。远程部分通常在网络运营中心来执行，而现场维护包括需现场执行的修理和维护工作。由于故障地点需要车来回往返地址，因此花费很大，应该尽量减少。

独立于 SON 的首要目标是以不存在故障情况或通过内置冗余解决故障这样的方式来设计产品。由于这常常是很不经济的，因此 SON 功能有助于优化处理和解决故障情况。

3.5.5.1　告警关联

用告警关联不仅能减少告警数目，也能自动执行分析，即直接找出问题根源。通过这种方式，告警关联减少了需要手动估计告警的工作。假设每年每个 eNB 平均有 0.2 个可能的告警，并且每个告警需要员工花费 20min 去手动修复，那么每年每个 eNB 潜在节省的人力总共能达到几欧元。更重要的是，可以降低故障或模糊诊断的风险，反过来又减少失败的次数以及不必要的访问。根据地址访问的节省数量，运行节省值大约为每年每个 eNB 10 欧元。

接下来，在故障情况的自动分析之后，引出自愈的概念，也就是对故障诊断的自动反应。故障自动反应的一个简单类型包括自动触发那些引起故障的元件或单元的复位。这些动作已经嵌入到框架内部，可以避免死循环，并且运营商仍可保持控制。再次说明，这种机制的结果是大约每年每个 eNB 可收益 10 欧元。

3.5.5.2　睡眠小区检测

如果发生故障情况但没有发出告警，就需要使用稍有不同的解决方式。一个典型的

例子是睡眠或者低性能小区的问题。例如，通过定期路测或通过受影响用户的投诉，可以识别这种小区。这些解决方案不是很昂贵，但会影响与用户的关系。预期的解决方案应该是积极且便宜的。从 SON 的角度来看，这两个目标能通过定期收集合适的性能数据或关键性能指示来实现。通过扫描这些数据可以识别不规律的睡眠或低性能小区。

3.5.5.3　小区中断补偿

故障反应的另一形式是暂时补偿故障结果，如重新配置相邻小区。小区中断的原因可能来自于在传输网络中的损失或能源故障或 eNB 自身的故障。

单元中断补偿的主要好处是保障收益。显然，不工作的小区不能产生任何收益。此外，小区中断降低了用户的满意度甚至会导致那些用户之间的亲密度降低。小区中断补偿将减轻这些影响。从经济原因考虑这个缓解只是某种程度上的（因为完全冗余的费用非常高）。重置邻小区以补偿小区中断会导致这些小区的原始覆盖范围下降。因此，小区中断补偿的思路是在受到小区中断影响区域内小区所产生的收益（即受影响用户所带来的收益）比用来做补偿小区的损失要大。

如前所述，推迟小区中断的固定解决方案仅在某种程度上可行，并没有完全消除所需修复的故障。因此，与运维支出有关的小区中断补偿的主要收益是延迟维修，直到它能以最高效率的方式执行。在交通拥挤的城区，可以在夜晚完成此操作，因为此时很容易到达小区所在位置。另外，如果职工模式不包括夜班，维修则需延期到第二天早上或从周末到下一个工作日。因此关于运维支出的主要潜在节省包括降低待机维修需求量和避免夜间或周末加班。

优化中断补偿的总体受益需要在改变维修导致的运营费用减少、中断补偿带来的部分收益保护（关于完全中断）和最终修复前的收益损失（由于补偿并不完美）三者之间权衡。

3.5.6　小结

本节给出了 SON 在很多方面给运营商带来的收益。

从长远来看，通过提高网络性能来减少达到某一性能所需网元数量的这一特征最有价值。这些特征不仅能节省网元本身的 CAPEX，还能节省所有相关执行和运营费用。

然而，这不应该理解为我们就可以忽略运维支出的优化。最后不管网络规模如何，运营商都应该尽可能去减少运维支出，因为其会直接影响到其盈利状况。

即使通过自动化来减少劳动力的特定场景不重要，由于改进的上市时间和其提供的较好网络有效性，SON 仍有效益。

3.6　SON 运行和技术挑战

3.5 节强调了通过 SON 所得到的商业收益。然而，由于减少网络部署和运营的开支是 SON 的主要目标，因此它与运营商运营过程执行的相应处理密切相关。所以，引入 SON 功能比通过软件或硬件升级来引入新的无线特征更具挑战性。因此，SON

的实施带来了运行和技术的双重挑战，它们是相互关联的，尤其是向拥有 SON 功能的系统过度是十分困难的，首先因为执行新 SON 功能需要投入最大努力并且要通过改变现存运行过程使其在真实网络中运行。在自动化系统中这些是典型的短期难点，但从长远看可以确保获得明显的效益。

3.6.1　运营过程向 SON 的过渡

图 3.13 给出了移动网络的高级运行生命周期（参见 3.2.1 节）。当前配置、优化和故障处理都是基于网络建设和运行/维修阶段的手动和半自动工作流程。

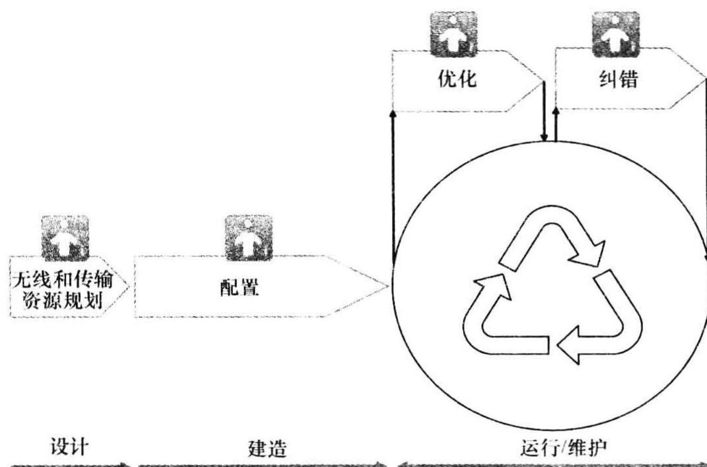


图 3.13　运行周期概述

在这个生命周期中，工作流程脱离于实际网络执行。为了优化，需要将性能和配置数据放置在一个离线工具里，并在其中进行运算。最终，创建并铺设出一个新的网络规划。

图 3.14 从较高等级表示了一个有 SON 功能系统的相应运营生命周期。在这种情

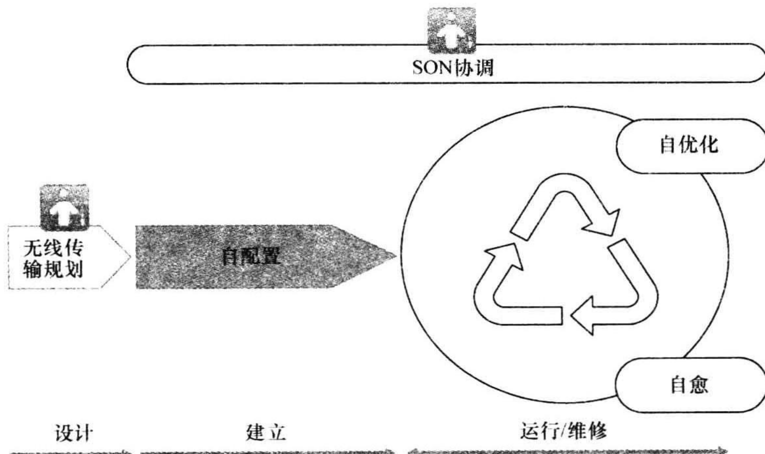


图 3.14　SON 的高级运行生命周期

况下，通过 SON 功能自动实现配置、优化和故障处理的工作流程。突发事故（如新 NE 的部署或小区中断）引发自配置和自愈，因此仍可以肯定相应的工作流程是由潜在的一些 SON 功能组成。为了自优化，每个 SON 功能需内嵌到一个正在运行而不是离线执行的网络。虽然运营商仍能安排和控制 SON 功能的行为，但不再强制需要以前所使用的固定的工作流程。通过专用调谐元件（参见第 9 章），单个功能协作、交互以保证系统一致和稳定，专用调谐元件也充当运营商控制整体系统的一个切入点。

作为运行生命周期的例子，图 3.15 给出了引入自配置后配置过程的变化。连接建立和 NE 试运转通过 SON 调谐元件，自动在设计时进行了调谐并在运行期间进行检测。因此，自动化功能（由远程 OAM 系统上监测）代替现场操作。一些功能从设计阶段的无线到实际网络建设阶段会发生一些变化（参见 4.2 节）。

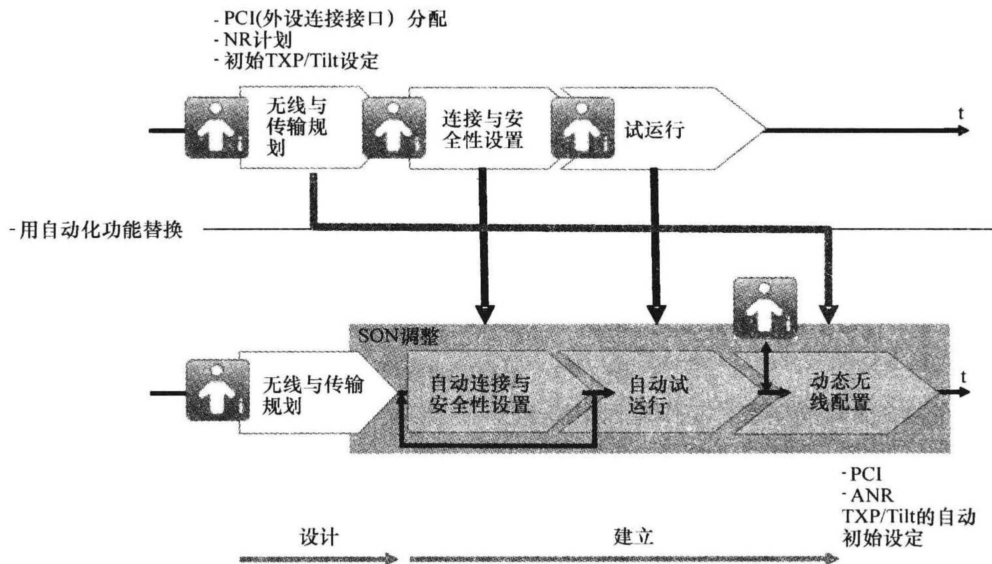


图 3.15　自配置生命周期中设计和建立部分的改变

从手动/半自动到 SON 激活自动运行的转变将改变运行生命周期。在转变过程中面临的挑战总结如下（Kasinger 等人，2006 年）：

1. 知识获取

如今，大部分（关键的）OAM“领域知识”已被运营商掌握。然而，为了设计 SON 解决方案，需要该领域知识。因此，应寻找获得和掌握所有这方面知识的方法。

2. 操作人员的接受度（“人员因素”）

对运营商而言，一个明显的非技术性的软挑战是其员工对 SON 技术解决方案的接受程度。

这包括 SON 功能与人机交互的自动实现。操作人员必须逐步信任有 SON 功能的系统，这意味着必须确保操作人员能够很容易追踪到所有的自主决断和操作。操作人

员必须随时保持控制，并能推翻SON系统所做的决定和操作。

SON能把运维人员的工作从运营期间低级反复的任务转变为像其他技术领域中自动操作一样更高级的、主要是预备工作的任务。因此，一方面工作类型更具创造性和挑战性（但是这需要员工提高技术水平）；另一方面，工作人员也会把自动化操作看成其特定工作的威胁。因为这定义了新的工作角色（自动化系统“设计时间”的预备以及对其“运行时间”的监管），新型工作有其自己的学习曲线。在过渡期间，仍需要一些低级的管理工作，这加在运营商正在执行的业务中。

应注意到，操作人员的接受度直接关系到之前提到的知识获取过程。

3. 人员水平进程的改变

将自动化工作流程部分与现存运营商过程相融合会产生在此过程级别上的一些初始复杂状态，这需要通过变更管理来协助。尤其是在SON执行网络规划、运行、优化以及故障处理的时间间隔时，改变（减少）时会要求相应的人员水平进程周期。

一方面，低水平自动化和单调的手动工序会导致较少的人为差错。另一方面，在较高水平下管理网络时，在发生一个错误的情况下，单个策略改变会同时影响多个运维流程，因此会引起更多损害。因此，如上所述，这些重大业务的决策制订需要一个较高的技术水平。

如图3.14和图3.15所示，离线执行的工作流程嵌入到网络运行中，这说明运维界限（在网络规划、网络运营和网络优化部门之间）变得模糊甚至会消失。另外，如上所述，运维人员在新组织机构中有了新的角色，两者都要求适当的变更管理。

多年来，运维人员往往已经调整好自己的工作过程，因此这些工作过程效率很高。而在这些已经熟练处理的工作过程中很难体现出SON的优势，这很可能会成为接受SON功能的障碍。

4. 避免运维人员和SON功能的冲突

运维人员执行的工作流程之间（例如执行由用户控诉引发的改变）和自动工作流程（SON功能的实现）之间可能存在冲突，使得SON功能对运维人员的行为做出错误的反应。例如，如图3.16所示，在这种情况下，运维人员试图重新配置一个小区的无线参数来关闭用户报告覆盖漏洞，但是SON功能［如覆盖和容量优化（Coverage and Capacity Optimization，CCO）］认为这是非最佳的更改并将它们撤销，这样覆盖漏洞仍然存在。这些问题能在SON功能相互作用的结构（参见9.1节）中得到解决，可以把运维人员的运维行为看作SON本身的特殊功能（拥有最高优先级）。

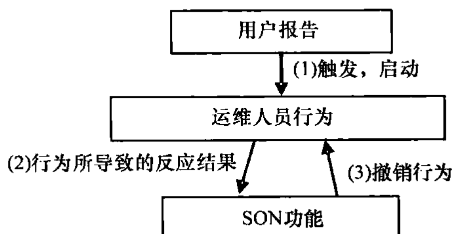


图3.16 人为操作和SON功能之间的竞争行为

3.6.2 技术（工程）挑战

接下来总结 SON 领域中的技术挑战。在相关章节中将强调那些挑战的解决方法。本书采取根据 SON 作用领域（配置、优化、故障处理/修复）的结构，即分别介绍相关领域 SON 功能，这些功能可以看作在不同网络上以相同方式工作的基本成分。随后可以构造这些功能，以［用不同的（运营商特定的）方法］实现由 NGMN 定义的 SON 应用案例。这个用例会重新融入到上述运行过程中。面临的挑战如下：

1. 从离线规划/预配置和优化转变至在线的 SON（参见第 1 章和 3.1 节）

1）面向事件的技术不仅适用于故障管理（Fault Management，FM），也适用于配置管理（Configuration Management，CM）、性能管理（Performance Management，PM）。这种特征与业务流程管理（Business Process Management，BPM）相似，但是还需要解决移动网络管理的不同需求（参见第 9 章）。

2）算法需要能以一种增长的方式来执行（事件触发方式，参见 4.2 节，动态无线配置，"一次性"/反复试验优化，参见第 5 章）。

3）加装：在传统系统上增加 SON 解决方案（可能会导致运行无效）与重新设计的系统部分（可能会导致实施支出高）两者之间的选择。

4）细节度：虽然仍有必要进行离线网络规划（如选址规划），其所要求的规划数据的细节度可以降低，但还需要一个合理的解决方案。

2. 从集中式向分布式执行的转变

分布式算法参见 3.4 节的一般讨论和第 5 章的自优化的特定实施。

3. 数据采集和处理

1）需要嵌入进常规系统运维中（而不是运维人员专门的操作），如路测，参见第 7 章（尤其包含了从移动终端获取的数据）。

2）需要协议支持，因此可能需要额外进行标准化（如 X2 支持自优化和自配置中供应商特定的 DHCP 选项）。

4. 知识管理

1）获取知识：这部分尤其困难，在自愈（参见第 6 章）的诊断部分中："现实世界"的错误及其原因的知识需要从专家手中获得，并嵌入到 SON 系统中。

2）知识陈述和维护：在信息模型/实体论中需要信息模型与实体的适当支持（标准化的意义）。

3）知识的发展：允许在线获取知识的学习方式。即使 SON 系统中实际运维完全自动化，监管学习部分仍需要大量的人员操作（即人工参与从实际网络运维转变到监管工作），参见第 11 章。

4）决策制定：需要诸如政策、概率图解模型和决策论等技术。

5. 安全性（参见 4.1 节，自动连接）

安全性与 SON 的 NE 初始安装及配置有关，因为 NE 铺设的安全环境不应该削弱自动化水平。在 NE 及其 OAM 系统（以及其他 NE）之间设置安全连接至关重要，因为虚拟安全性（虚拟回程连接，公共环境中毫微/微型基站的安装）正不断地代替物

理安全性［专用的物理回程连接，（宏）基站的安装，锁橱］。此外，自动化本质上就是要减少人员与机器的交互，从安全的角度来说就是减少系统安全方面的人力监管。因此，分析工作量的减少是否可接受，以及 SON 功能是否会产生一个反过来需要安全机制去解决的新威胁场景十分重要。

6. 拥有 SON 功能的系统管理（沿着 NE 的整个生命周期，参见第 9 章）

1）检测系统以确保运维人员的控制和可维护性（参见运行挑战）：记录、跟踪、报告。这也包括一个标记拥有 SON 功能的系统与传统网络的性能对比。

2）拥有 SON 功能的系统可操作性：如前所述，运维人员不需要执行低等级的工作（即运维人员的主要工作从维持运行时的运维转向了设计阶段）。然而，应该保证这些高等级工作的可操作性（通过提供合适的工具，这些工具允许减少需要维持的不同操作政策和工作流程的数量）。

7. 可靠性

1）在所有网络配置和环境下的统一行为。

2）出错情况下的控制行为（如增加运维人员）。

3）特征交互（还要考虑特征随时间的演变），该内容会在第 9 章介绍。这关系到 SON 特征之间以及传统 OAM 特征和 SON 之间的交互。

参考文献

3GPP TS32.500 (2011) Technical Specification Group System Architecture, *Telecommunication Management; Self-Organising Networks (SON); Concepts and Requirements*, ver.11.0.0., Release 11, 18 June 2011. Available from http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/32_series/32.500/32500-b00.zip [accessed 30 June 2011].

3GPP TS32.50x (2011) series, Specification Group System Architecture, *Telecommunication management, Self-Configuration of Network Elements*, 3rd Generation Partnership Project (3GPP).

3GPP TS32.52x (2011) series, Specification Group System Architecture, *Telecommunication Management, Self-Organizing Networks (SON) Policy Network Resource Model (NRM) Integration Reference Point (IRP)*, 3rd Generation Partnership Project (3GPP).

3GPP TS32.53x (2011) series, Specification Group System Architecture, *Telecommunication management, Software Management (SWM)*, 3rd Generation Partnership Project (3GPP).

3GPP TR36.902 (2011) Technical Specification, Technical Specification Group Radio Access Network, *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Self-Configuring and Self-Optimizing Network (SON) Use Cases and Solutions*, ver.9.3.1., Release 9, 7 April 2011. Available from http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.902/36902-931.zip [accessed 30 June 2011].

Bandh, T., Romeikat, R., Sanneck, H., and Tang, H. (2011) Policy-based coordination and management of Self-Organising-Network (SON) Functions. IFIP/IEEE Symposium on Integrated Management, Dublin, Ireland, May.

Heylighen, F. (2009) Self-Organisation, Principia Cybernetica Web. Available from http://pespmc1.vub.ac.be/selforg.html [accessed 15 June 2011].

Ising, E. (1925) Beitrag zur Theorie des Ferromagnetismus. *Zeitschrift für Physik*, Bd. **31**(S). 253–258.

Kasinger, H., Bauer, B., Sanneck, H. and Schmelz, C. (2006) A management automation framework for mobile networks. In Proceedings of the 17th World Wireless Research Forum, Heidelberg, Germany.

Kephart, J.O. and Chess, D.M. (2003) The Vision of Autonomic Computing, *IEEE Computer Magazine*, pp. 41–50.

IBM (n.d.) Autonomic Computing, http://www.research.ibm.com/autonomic/ [accessed 1 August 2011].

IASB (2003) International Accounting Standards (IAS) 16 – Property, Plant and Equipment.

NGMN (2007) NGMN Informative List of SON Use Çases, NGMN Technical Working Group, Self Organising

Networks, (ed. F. Lehser), April.
NGMN (2008) Use Cases related to Self Organising Network, Overall Description, NGMN Technical Working Group, Self Organising Networks, (ed. F. Lehser), December.
NGMN (2010) Top OPE Recommendations, NGMN P-OPE PROJECT, (ed. F. Lehser), September.
Sanneck, H., Bouwen, Y. and Troch, E., (2010) Dynamic radio configuration of self-organizing base stations. 7th International Symposium on Wireless Communication Systems, York, September.
Sanneck, H., Schmelz, C., Bandh, T. *et al.* (2010) Policy-driven workflows for mobile network management automation. In 6th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, Caen, France.

第4章　自配置（即插即用）

Henning Sanneck、Cinzia Sartori、Péter Szilágyi、Tobias Bandh、Christoph Schmelz、Yves Bouwen、Eddy Troch、Jürgen Goerge、Simone Redana 和 Raimund Kausl

无线接入网络中，根据不同的部署方案，我们需要进行新的网络单元（Network Element，NE）安装、NE 硬件改造和软件升级，这会导致相当可观的重新规划和重新配置工作（参见2.1.8节）。这样，待安装和配置的网络单元（尤其是基站）总数成为了一个重要开销因素。随着现有网络的发展和无线接入技术的引进（比如 LTE），小区会进一步缩小（因为容量驱动的部署方案，参见2.2.2节/2.2.3节），因此小区总数会进一步增长且全网部署成本会进一步提高。正如3.3节所述，LTE SON 仍以“infrastructure networks（基础设施网络）”为目标，也就是说，即使部分配置可以在空中接口产生或者获得（比如从相邻基站），运营商通过中心操作管理维护（OAM）系统进行的管理工作仍发挥着重要作用。

对于 LTE - Advanced（参见2.1.8节），自配置的重要性随着网络单元密度而不断增长。此外，除了现有的宏网络设备，其他所部署的网络单元（如微型基站和中继）都是固有的低成本设备。因而，这些网络单元的安装和配置成本也必须比宏网络的网络单元更低。并且对于这种部署，NE 的物理安全性得到保证（就像很好地保护在上锁的箱子里一样），安全相关的人工操作也减少了。同样考虑到基于 IP 的多地址回传，这使得在自配置过程中网络安全初始化的整合变得尤为重要。

自配置（Self - configuration）是一种通过最少的人工操作来实现加入新网元或网元组建的过程。这个过程包括三个阶段，如图4.1所示。自连接（Auto - connectivity）：基站安装完成并启动后，在 eNB 和 OAM 间建立安全连接（Sanneck 等人，2007）；自调试（Auto - commissioning）包括自动预备以及自动测试软件和网络单元配置数据，

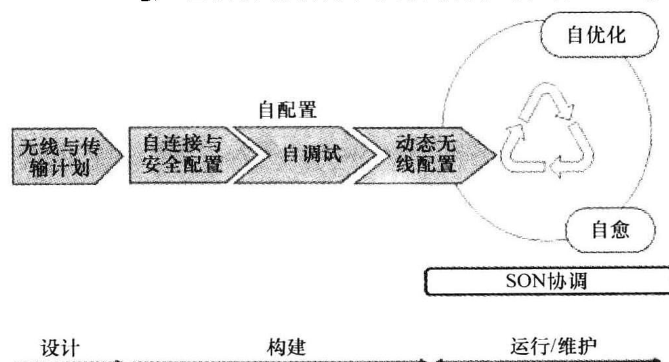


图4.1　SON 生命周期中的自配置阶段（Sanneck 等人，2010b，2010 IEEE 准许转载）

主要根据安装网络单元的硬件类型和具体站址网络单元的必要功能来执行；最后，动态无线配置（Sanneck 等人，2010b）通过在空中接口产生和获取的无线配置参数来补充配置数据，这些配置数据为调试阶段下载的。也就是说，网络单元为使其配置适应网络当前部署状态，会采用一种“增量”配置方式，以便消除每个部署阶段的重新规划需求。

4.1 自连接和自调试

自连接和自调试的目的是将网络单元自动地连接到其域名管理（DM）系统，从而尽可能地避免人工干预。该过程中也必须加入网络单元的安全建立（即根据安全性要求，也要尽可能多地避免人工操作）。它将运营商和设备商的工作转移到准备（而不是实际推出）阶段，并尽可能地减少他们间的协同工作（见图4.2）：网络单元仅通过一个微型即时软件和安装配置文件来实现自连接和自调试。只有当网络单元布放在站址时，网元的硬件—站址映射才可以实施。连同网元的网络身份验证，可以完成一个非常灵活和安全的部署过程。从图4.2可以看出，减少推广部署阶段的前期工作时间可以带来灵活的收益，也就是说，网络规划和相应的网络单元配置可能改动到实际网络单元物理站址启动推广。

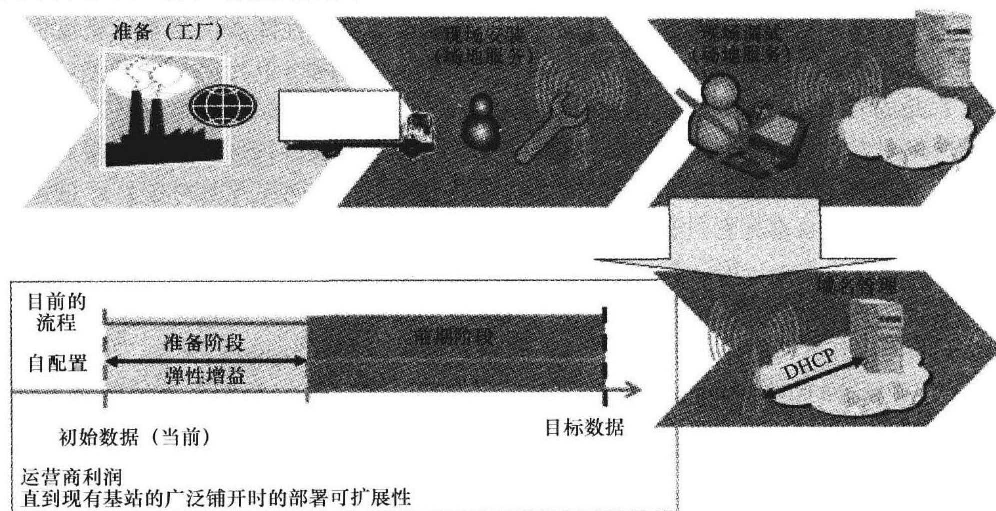


图4.2　自连接和自调试：高层过程（Sanneck 等人，2007，2007 IEEE 准许转载）

OAM 连接自动建立的目的是减少工作人员进行初始参数配置的工作成本。可以通过 eNB 从 DHCP 服务器和自动连接服务器（ACS）获取初始化参数来实现，过程如下（Sanneck 等人，2009）：

1）基本连接建立：网络单元获得初始 IP 配置，以便与 ACS 和运营商证书签证机关（CA）服务器通信，有时通过动态主机配置协议（IETF RFC 2131）与安全网关（SEG）进行通信。初始 IP 配置在后续自配置阶段可能由一个永久的 OAM IP 配置

替换。

2）初始安全连接建立：安全性是基于公匙来进行认证的、完整的和机密的保护。网络单元通过证书与其他网络单元（直接或通过 SEG）通信。证书由运营商的 CA 服务器产生，NE 在与 ACS 建立安全连接前需要下载证书。此外，网络单元需要一个运营商的固定信任文件 trust anchors（根证书），以便在常规操作过程中验证从其他网络单元接收到的证书。当网络单元最初从设备工厂出库时，运营证书和根证书并不可用。因此，网络单元需要用设备商为其提供的设备证书在运营商 CA 服务器上进行验证，进行运营证书注册。成功进行自动认证注册的网络单元拥有了自己的运营证书，一整条信任链（运营 CA 根证书和随机 CA 子证书）就建立起来了。现在，网络单元可以通过 IPSEC 协议或（和）TLS 协议与 ACS（或 SEG）建立安全连接，继续进行自连接（Auto－connection）。

3）站址鉴权需要定义网络单元应该使用哪些离线准备配置数据，通常每个站址都需要专用的配置数据。

4）最终配置和传输参数的下载。

5）与域名管理器（DM）的安全连接建立：与 ACS 的临时安全连接拆除后，新的连接建立。该连接可由运营商选择 TLS 协议或（和）IPsec 协议保护。注意，使用 IPsec 协议来保护 OAM 连接是 3GPP 强制规定的（除非保护制度已经建立的情况，如物理安全链接）。

自连接和安全建立由自配置实体完成，自配置实体既存在于网络单元（客户端）也存在于网络（服务器）端，如图 4.3 所示。客户端实体从服务器端实体获得初始配置数据。

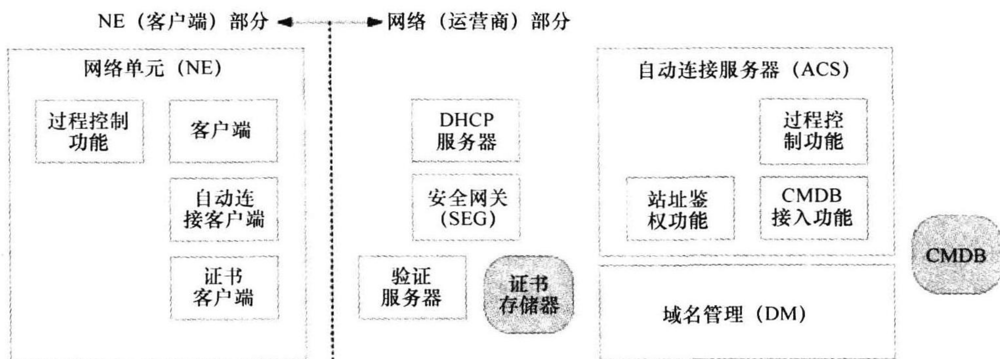


图 4.3 自连接和安全建立：实体

自配置的实体在网络单元侧执行下列功能：

1）过程控制：控制自连接和自调试步骤；

2）DHCP 客户端：获取初始 IP 配置；

3）证书客户端：获取/存储网络单元证书；

4）自动连接客户端：与自动连接服务器建立安全连接，注册请求。

服务器端存在下列实体：

1）DHCP 服务器：提供（基站的）初始 IP 地址配置和服务器端 IP 地址。

2）ACS：

① 站址鉴权功能：将一个具体的网络单元（存在惟一的硬件身份）映射到一个具体站址。

② 配置管理数据库（CMDB）：存储网络规划中获得的网络配置信息（站址，地理位置）。

③ CMDB 接入功能：提供初始配置数据和登记安装 NE 的硬件身份。

3）CA 服务器：验证 NE 并提供证书。

4）证书存储器：持有运营商根证书以及由运营商证书官方机构颁布的所有服务网络单元的网络单元证书。

5）安全网关（SEG）：将安全操作域［包括运营商 OAM 系统和演进分组核心网：EPC］从网络单元物理连接到的传输网络域中分离出来。

4.1.1 准备阶段

为了支持自连接过程，设备商和移动网络运营商需要做预配置。

4.1.1.1 设备商的准备工作

1）设备商会给网络单元分配一个硬件身份（HW - ID），即硬件模块的序列号，以便其在交易和服务过程中识别网络单元硬件。此外，HW - ID 也可以作为建立设备商网络单元身份的基础，设备商网元身份会在设备商网络单元证书中使用。HW - ID 应该始终分配给一个网络单元硬件，并且不可以被改变（然而，HW - ID 管理自然是由具体的设备商决定如何执行的）。

2）网络单元出库时需要至少携带初始软件和配置数据，以便支持初始启动、自动连接、安全设置以及基本的自调试。所有其他软件包，依赖于硬件配置和基站安装所在移动网络环境的，可以现场下载，作为后续自动或手动调试阶段的一部分工作。注意，这甚至可以延伸到具体的无线电技术，也就是说，通常多模基站出厂后，可以通过现场软件下载和配置成为 3G 或 LTE 基站。

3）设备商密匙/证书的生成和安装：经过一定制造程序，网络单元生成它自己的公/私钥对，并本地存储在一个可信环境（TrE）里，这样私钥就再也不需要在网络单元以外出示。然后，NE 向设备商 CA 服务器申请公钥证书并本地存储（设备商网络单元证书包括设备商网络单元身份）。当 NE 销售给运营商时，用于签署设备商网络单元证书的设备商 CA 证书会（以一个安全的方式）转交给运营商，并存储在运营商根证书 CA 池中。网元中密钥的生成和安全存储在可信环境中实现，可信环境可以通过密匙存储软件程序（通过模糊方式实现安全性）或硬件解决方案如受信平台模块（TPM）来实现，并可以通过可信赖计算组来标准化。

在工厂时，对于任意具体运营商或具体站址的参数及软件的网络单元预配置应该取消。这样可以简化制造流程，并可令网络单元为任意运营商和站址所用。

4.1.1.2 运营商的准备工作

运营商的准备工作可以分为工程任务和网络单元任务。工程任务包括，如部署一

系列新基站来改善无线覆盖或提高网络容量。每次工程任务仅需要执行一次大规模的网络单元自连接功能。自连接功能仅需要一些额外的准备工作，这些准备工作取代了配置工作，否则配置工作将由安装人员和（远程）专家完成。与安装和调试站点上节省的运营开支相比，这些准备工作的运营开支可以忽略不计。

1. 运营商工程准备工作

1）在传输接入网的末端，传输网准备处理网络设备配置（如微波传输）、虚拟局域网以及基于汇聚网和核心传输网络的虚拟专用网（Virtual Private Network，VPN）的流量工程和配置。在运营商部署第三方传输网络的地区，这个准备工作会外包给相应的服务提供商。应该指出的是，这种准备工作（虽然是基站自配置的一个必要条件）本身是一个应用案例，自然很大程度上取决于运营商的需求。

2）DHCP服务器的配置必须为网络单元提供初始IP配置，自动连接服务器（ACS）地址，运营CA服务器和SEG地址，这些会在网元自动连接和自配置时使用。ACS、CA服务器和SEG地址为设备商的DHCP可选项，由网络单元实现自动连接功能时选择。大多数商用DHCP服务器允许配置设备商的DHCP可选项。

3）自连接服务器配置：

① 配置地址来接入ACS或由ACS访问。

② 安装运营根证书［仅在ACS停止与网络单元的安全连接（TLS）时需要］。

③ 访问配置数据库，检索自配置数据和更新网络拓扑。

4）SEG：安装运营根证书。

2. 网元的运营准备工作

1）考虑到在网络中加入新的网络单元，传输网和无线接入网的规划需要在安装前完成。这一切不会改变，直到自连接部署（然而，在后面内容“动态无线配置”概念提出后，事实上大量的无线规划工作得以减少）。

2）接入网元规划是运营商网络规划部门的工作，可以通过专用规划工具完成。在规划过程中，运营商通过“Site - ID”来识别网络单元。Site - ID可以确定出明确的网络单元规划（地理）位置，也可以作为网络单元配置数据的标识。它可以包含邮政地址连同进一步的位置名称，如“站址：Claudiusstr. 1，10557 柏林路：x”，也可以包含GPS坐标。

3）向域名管理器转移规划数据：自连接过程中需要输出站址规划（网络规划的一部分），以便于站址确认工作。利用Site - ID可以找到最终的IP传输配置和进一步的网络单元配置。因此，作为准备工作，规划数据必须从规划工具转移到域名管理器。通常这是由多厂家配置管理准备工具处理的，操作人员需要在域名管理器上开启检索规划文件的任务，或者指示域名管理器通过标准化接口下载文件。需要特别强调的是，Site - ID对于移动网络中的基站来说非常重要，因为它可以指示地理位置，所以自然成为了移动网络运营商在无线网络规划工作中的固定成员。

4）自动连接服务的准备工作：域名管理服务器存储无线网络规划文件后，部分规划文件将导出并传送到自动连接服务器。在规划文件由3GPP批量配置管理IRP（综合参考点）接收的情况下，自动连接功能将自动调用。这样，自动连接服务器可

以使用规划文件来处理自动连接请求。

5）CA 服务器的准备工作：每次购买并投放一批网络单元时，运营商都要下载设备商网络单元身份列表（包括在设备商网络单元证书中），如从设备商销售网站上下载。如果在实际的自动连接过程中，网络单元申请运营商证书，运营商 CA 服务器则会将网络单元注册证书时接收到的设备商网络单元身份与已经订购和发布的网络单元身份进行对照，仅当身份匹配时分配网元证书。

3. 安装工程师的现场工作

1）剩余的安装工程师的主要工作为网络单元的硬件安装和网络单元与天线的物理连接，传输网络和功率输送。

2）安装工程师为网络单元上电，并监督网络单元的 LED 指示灯，观察自动连接建立是否可以成功进行。当自动连接不成功时，安装工程师可以通过向远程专家寻求帮助来解决问题（很有可能准备工作没有正确执行）。如果安装没有问题，安装工程师可以离开现场。进一步的网元配置由远程专家或自动调试功能自动执行。

3）不再需要一个专家（熟练并被运营商信任）前往现场，连接笔记本电脑，键入初始配置参数。这些工作中，部分可以取消，部分可以转移到动态无线配置，参见 4.2 节提及的具有成本效益的远程专家全过程监管。

4.1.2　连接建立、站址鉴权和自动调试

图 4.4 中的消息流说明了鉴权和安全建立步骤，更具体地说明了自动站址鉴权过程。注意，每步如何执行会有不同选择（如使用标准的 DHCP 和使用私有协议都能满足相同的要求）。所述每种选择都可以在特定情况下体现最好的特性（如 DHCP 协议被证明是基于标准的、可靠执行且容易使用的协议），所包含的证书注册过程在 3GPP TS 33.310（2010）中标准化，并被 Horn 等人（2010）详细解释。

1. 基础连接设置

安装工程师给网络单元上电后，网络单元会执行自测试程序，然后开始自动连接过程。网络单元建立层 2（传输层）连接并发送 DHCP 请求。传输连接需要符合上述传输网络预配置。对于 LTE 来说，通常会通过传输网络建立一个默认 VLAN（然而传输连接实际上使用其自身的自动连接功能）。DHCP 服务器从预留地址池中指定 IP 地址，为网络单元提供初始 IP 配置、ACS 和 CA 服务器地址以及（可选）安全网关（SEG）地址。如果使用隧道模式的 IPsec 协议，DHCP 会提供初始 IP 地址，这既会作为运营网络域的“内部地址”，也会作为隧道本身的“外部地址”（“隐藏”IP 地址）。

2. 证书注册

网络单元创建一个新密钥对，并使用证书管理协议（CMP）与 CA 服务器通信获得公钥，该公钥是由新的运营证书为网络单元签署的。然后，网络单元会进一步下载根证书，比如运营商公共签署 CA 证书。如果订购并布放的设备商网络单元身份序列号列表之前已从设备商处下载，CA 服务器可能会选择性地验证网络单元是否属于订购网络单元池，因为设备商网元身份也已经通过 CMP 协议传送给 CA。一旦网络单元

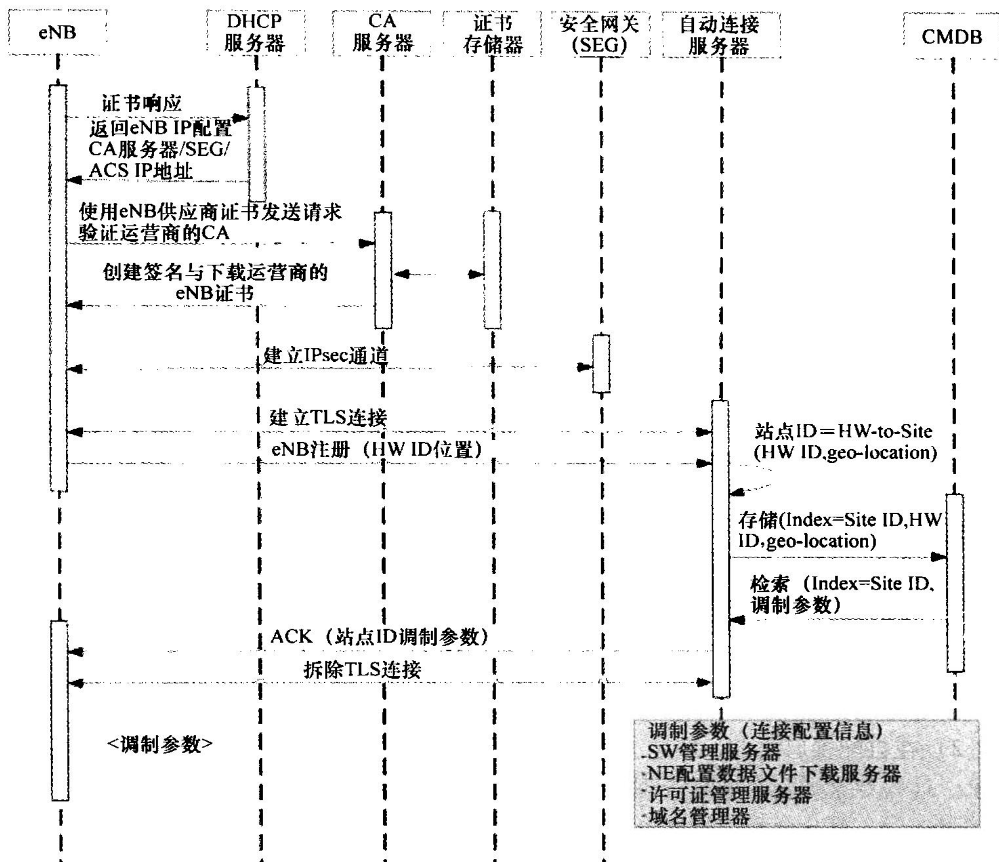


图4.4 自动连接和安全建立：消息流

知道将要使用的最终运营商节点证书，它可以持着正确的运营商节点身份，通过IP-sec协议或TLS协议（依赖于证书的属性）与所有通信对象建立安全连接。

3. 安全连接的建立/鉴权

根据运营商的安全体系结构，网络单元将会建立一个通往安全网关（在运营商值得信赖的网络边界）的初始IPsec隧道，或与ACS之间建立TLS连接。万一IPsec和TLS都需要使用，TLS连接会在IPsec隧道上建立隧道。安全网关或ACS使用运营商根证书来验证运营商签约网络单元的证书。在进行握手时，网元也会通过运营商的根证书来验证安全网关或已获得TLS证书的ACS。相互认证后，它们将会通过该连接将所有消息加密/解密。

4. 站址鉴权

网络单元向ACS发送公告消息，包括硬件ID和测量的GPS坐标（如果可用）。实际上，站址鉴权是在ACS中完成的，ACS会匹配网络单元提供的信息与ACS中的预配置信息来进行站址鉴权。然后，ACS会与配置管理数据库（CMDB）通信，在“在线配置数据库”（与站址ID相关）上存储硬件ID，更新网络拓扑数据库，并获得

下一步自动调试的相关参数。

ACS 的站址鉴权任务还包括确定发送自动连接请求的准确站址。一旦确定了站址的硬件身份，安装的网络单元会与配置数据库中的站址 ID 映射起来，这进一步称为“硬件站点映射”。

站址鉴权可以使用不同的机制，包括人工协助的解决方案和完全自动化的解决方案（Bandh 和 Sanneck，2011），见表 4.1。

表 4.1　站址鉴权和 HW - to - site 映射选项

位置	手动	半自动	自动
本地	计划的 Site - ID 安装者手动安装	测量站点 通过 Eth 将自动 GPS 接收器（PDA）添加到 NE 中	测量站点 使用安装了 GPS 接收器的固定天线
远程	HW - ID 和计划 安装者一人可以阅读的形式（文件或电话）接收 W - ID 和计划的 Site - ID，HW - ID 手动配置进入数据库	从 PDA 中扫描获取 HW - ID，安装者从 SMS/Web 接口获取 Site - ID，并嵌入 PDA。HW - ID 手动加入数据库	—

1）自配置程序启动前，由安装工程师手动输入惟一的站点 ID，然后网络单元向 ACS 发送自动连接请求。

2）在自配置启动前，安装工程师会将硬件 ID 和新的网络单元站址 ID 告知远程专家。远程专家则会在域名管理器的配置数据库中输入硬件 ID/站址 ID 映射。自动连接建立后，ACS 会利用硬件 ID 查询配置数据库，找出对应的站址 ID。

3）不同于以往的半自动解决方案：硬件 ID 的现场收集工作是通过集成了条码阅读器的 PDA 从帖纸上扫码来完成的，安装工程师仍会输入站址 ID，并启动短信、邮件或网络会议来更新配置数据库。对比以前的解决方案，该方案不需要任何远程专家支持。

4）安装工程师通过一个手持 GPS 接收机来收集站点的地理坐标，并通过适当接口（比如以太网）传输给网络单元。ACS 通过地理匹配算法将 GPS 参数映射到站点 ID。

5）站点坐标可通过一个固定的安装有天线的 GPS 接收机自动获得。当基站需要一个永久的 GPS 接收机用于无线同步时，这种解决方案的花费是有必要的。

显然，实际上 ID 的匹配/映射总是在服务器端完成的（测量位置与规划位置的匹配取决于站点 ID、硬件/站点 ID 与正确规划数据的映射）。

5. 网络单元自动调试信息的准备工作

ACS 在 ACK 应答消息中提供站点 ID 和自动调试参数。在网络单元通过一个独立安全连接（TLS）与 ACS 通信的情况下，网络单元稍后会释放连接并与域名管理器/自动调试服务器间建立一个新的安全连接。网络单元现在可以准备进行真正调试了。

6. 自动调试

图 4.5 显示了在图 4.1 中介绍的自配置阶段所考虑过的步骤。

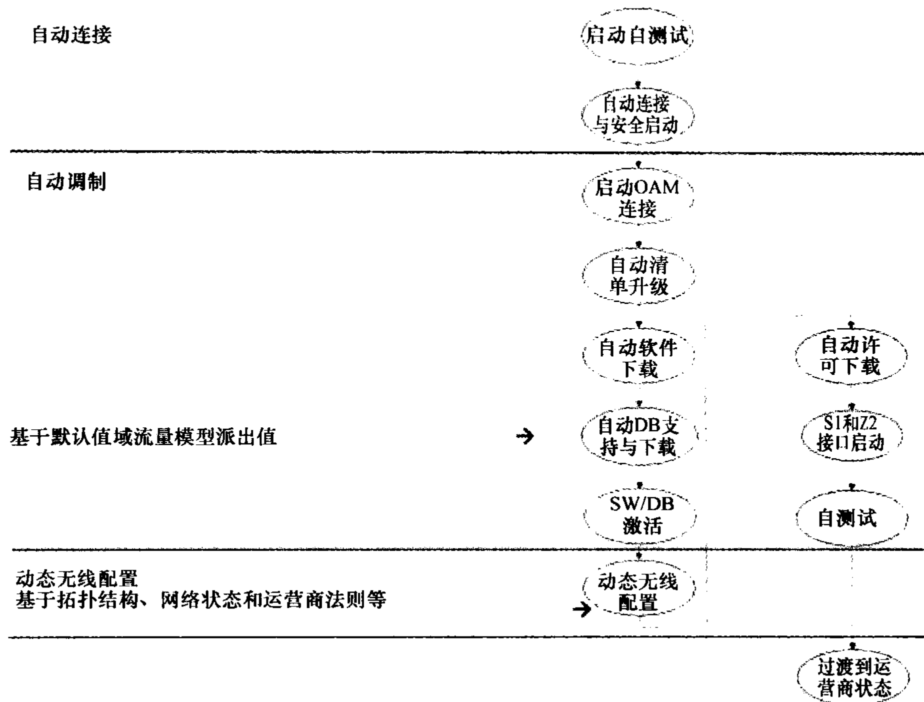


图 4.5　自配置步骤（见图 4.1）阶段

初始开机自检完成后，网络单元与 OAM 系统的连接就即时建立了。接下来可以进行自动调试过程。

自动调试的组成如下：

（1）自动库存更新

自动识别基站内部（硬件安装板）和外部（天线）组件。采集数据传送给 OAM 系统，而在 OAM 系统中网路单元的 CMDB 会更新（数据可以对具体的站址规划生效）。

（2）自动软件下载

根据具体网络单元类型和 OAM 要求站点的软件版本要求，网络单元触发当前软件版本的授权。注意，这些要求甚至可以包括具体的多模网络单元。因为所述用出厂默认软件安装网络单元过程是可行的，通常现场操作所需（最新的）实际软件将（在过程中相对较晚时刻）被安装。

（3）自动数据库准备和下载

网络单元会下载站点/网络单元的基本配置。配置数据已经在无线和传输规划过程中准备好。

1）更新的软件和配置数据会被激活（如通过重启 NE）。

2）作为“自动数据库准备和下载”的补充，在设定安装时需要预备的空中接口无线参数，这被认为是“动态无线配置”的独立阶段：DRC，4.2 节。

3）网络单元进行完全安装和配置后，会执行相应的许可证管理程序。

4）最后，呼叫处理接口建立，网络单元执行最后的自测试。

5）基于配置策略，网络单元现在可以改变运行状态或执行人工干预的专用步骤（网络可接受的）。

与自动连接相比，像软件管理，配置数据库准备这些实际功能都是典型的继承功能。实际的区别只在于，作为自动调试过程的一部分，它们是自动触发的（由网络单元或 OAM 系统）。

应该注意的是，所描述的自动调试步骤的顺序不是固定的，很少可以标准化，因为它是高度依赖具体供应商实现的。不过也存在一些逻辑关系，有人主张将它们使用特定的顺序：

1）软件安装需要知道安装的硬件组件（如前面自动库存的一个步骤）。

2）网络单元的数据库配置可能依赖于一个具体的软件版本，或者需要运行一个具体的软件版本（如前面软件下载步骤）。

3）序列号管理以及接口建立需要网络单元进行完全配置（如前面数据库下载和 DRC）。

描述的（见图 4.1）阶段的顺序和（见图 4.5）步骤需要（机器层面）监管，如在有一个步骤错误的情况下作出反应。

相应的控制逻辑既可以在网络单元本身中实现也可以在 OAM 系统中实现。概念上讲，这个控制逻辑是常规“SON 操作”中的一部分（参见第 9 章）。

虽然确切的顺序和每个步骤的细节没有规范（认证和证书交换过程除外），3GPP 已经规范了自配置和软件管理综合参考点（IRP）来实现一个高层次、多厂商能力监管的自配置（3GPP TS32.501，2010）。这种监管依赖于在执行自配置步骤前选择“停止点”的能力。自配置过程在停止点中止，直到收到监督实体的请求才会恢复。

图 4.6 展示了自配置管理（Self - configuration Management，ScM）实体，它由 IRP 管理器从 Itf - N 接入的 IRP 代理来实现（3GPP TS32.501，2010）。

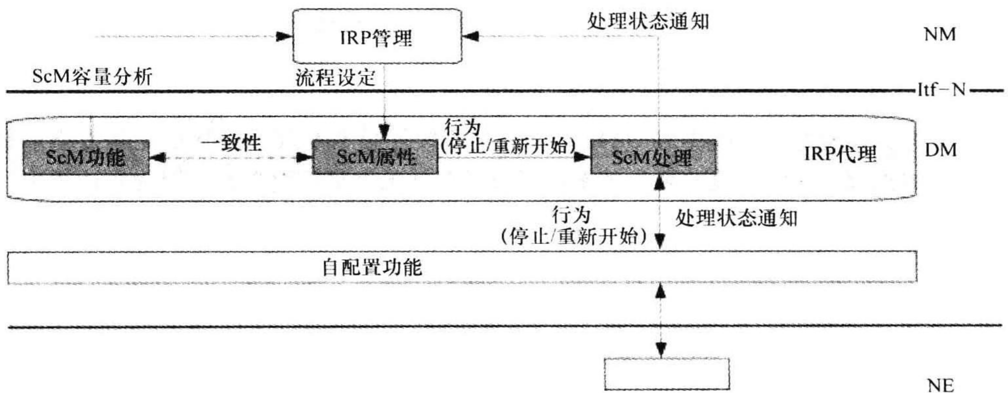


图 4.6　自配置管理（ScM）IRP

自配置管理实体包括如下功能：

1）自配置管理能力：该实体包括自配置步骤的顺序和在执行步骤之前选择一个停止点的可能性。此外，在自配置过程结束后，提供设置不同管理状态（锁定/解锁）的功能。

2）自配置管理配置文件包括 IRP 管理策略、关于自配置管理能力中提供的可能停止点、可以实际使用来中止具体网络单元类型的自配置过程，而且可以选择要求的最终管理状态。

3）自配置管理过程包括网络单元自配置过程的实际状态。因此，IRP 管理器可以被告知自配置过程的进展。当由 IRP 代理器指示的自配置过程开始时，自配置管理过程自动创建。

在准备阶段，IRP 管理器获得自配置步骤中的信息（自配置管理能力），然后基于 NM 级要求（如在不同域名管理器下执行全自动步骤协调）设置自配置管理配置文件。在运行时间，也就是当 NE 实际上已经自配置时，自配置过程可以被监管。在上述停止点，IRP 管理器可以采取行动来恢复或中止进一步操作。

软件管理 IRP（3GPP TS32.532，2010）基本上与自配置管理 IRP 相同（即在自配置—自调试过程中软件管理被考虑作为一个自有过程）。与 ScM IRP 类似，一系列停止点需要被提供、选择并实施。此外，将被安装的软件版本信息以类似的方式进行管理（即提供、选择和实施）。

4.1.3　LTE-A 中继自动连接

中继节点（RN）是一种移动网络基站，通过带内无线回传链路连接到无线网络，而不是通过专网或无线回传链路，比如以太网或微波链路（参见 2.1.8.3 节）。通过无线回传（即中继常规空中接口）连接，而不通过专用链路连接，会在访问移动网络运营商的 OAM 系统时增加困难。因为在 LTE-Advanced 出现中继节点以前，无线接入仅为用户设备保留，而不为全网网元所用。然而部署了中继节点后，建立初始 OAM 接入在任何配置中都是必不可少的，尤其考虑到基于自配置原则的自动配置过程。

基于尽量减少部署成本的需求（Lang 等人，2009），部署网元的相关过程应自动化，以避免人工介入的高额花费。可以预见，中继节点的部署总数与 LTE eNB 的常规部署数目息息相关，因此自动化需求也是从规模考虑来要求的。此外，为满足变化的运营要求，与常规 eNB 相比，中继节点的物理位置改变会更常发生。因此，与常规 eNB 相比，中继节点的初始配置的自动化也更重要。

4.1.1 节和 4.1.2 节中描述的自动连接和自动调试方法适用于所有 eNB，但不适用于没改造的中继节点，因为中继节点是一个不包含层 2 网络的无线节点。此外，仅在中继节点处于运行状态时，Un 接口（参见 2.1.8.3 节）可在中继节点和与其相关的受体 NB（Donor eNB，DeNB）间使用，即当中继节点已经与 DeNB 完成协商资源划分时，这些资源包括中继链路、接入链路以及网络单元准备接收的 UE 连接数。当中继节点已经初始上电，并尚未鉴权为网元时，中继节点必须通过标准化无线接口使用惟一的接入方法，即在无线资源控制（RRC）接口建立后，会进行 UE 附着过程

（3GPP TS23.401，2010，它的目的以及哪些被完全建立稍后阐述）。使用标准化的接入方法是非常重要的，它可以避免任何阻碍中继自配置的标准化影响。然而为便于UE进行附着过程，中继节点需要担当UE的角色和具有UE标识。

另一个值得关注的是，中继节点在UE附着网络过程中，应该使用哪个eNB来完成初始接入。一个显而易见的选择就是DeNB，因为当它配置完成后，中继节点会通过其连接到网络。然而，这个选择未必可行，下面将详细列出选择列表。

4.1.3.1 DeNB 选择策略

为便于理解障碍，需要基于何时做决定选择DeNB来考虑可能的DeNB选择策略：

1）在网络规划阶段，运营商离线选择DeNB。OAM系统预存DeNB association作为规划数据的一部分。当中继节点已经部署并进行自配置时，会下载所选DeNB association。

2）在基于从中继节点获取数据（如从不同eNB收到的无线电信号强度、干扰信号和噪声比）的部署过程中，OAM系统会动态选择DeNB。OAM侧会获得网络的额外消息（如eNB位置规划），而网元侧却不可以。经OAM评估后被选中的DeNB association会下载到中继节点。这种方法的优点是可以根据最新参数和当前网络实际状态（即不仅是规划状态，这在初始部署过程中可能会有所不同）来做决策。

3）在部署过程中，中继节点独自选择DeNB。这种策略的优势在于它是可伸缩的，因为决定不上报给OAM系统，而保存在本地。而缺点（与之前方案相比）则在于所做决定仅根据现有信息和中继节点所得信息，而这通常不像中心OAM系统监管全网一样来源广泛。注意，对于中继节点获知是否相邻基站可以作为Donor eNB，还没有标准化原理。

显然，在前两个DeNB选择策略方案中，中继节点在连接到OAM系统前，并不会预先得知DeNB association。另一方面，既然Donor eNB是无线节点，它必须通过连接到eNB来接入核心网，甚至连接到OAM系统来进行初始配置。因此，如果使用中介eNB在其初始连接阶段帮助中继节点与OAM建立连接，最高级别的灵活性选择应该保留。这种eNB称为“配置eNB”或“CeNB”（见图4.7）。在中继节点通过配置eNB完成自配置（第一阶段）后，中继节点可以切换到DeNB（第二阶段）并输入运行状态（见图4.8）。

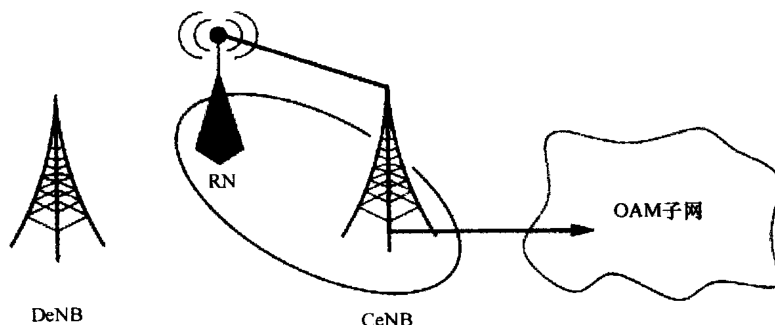


图4.7 通过CeNB建立初始连接（第一阶段，Szilágyi和Sanneck，2011，2011 IEEE准许转载）

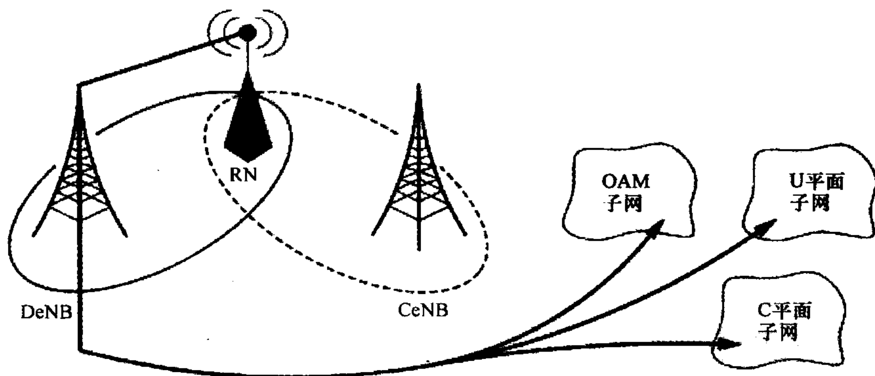


图4.8　通过DeNB建立最终连接（第二阶段，Szilágyi和Sanneck，2011，2011 IEEE准许转载）

4.1.3.2　CeNB

CeNB可以是任何覆盖了中继节点覆盖区的可接入eNB。对于中继节点选择的CeNB是没有其他特殊要求的，所以选择可基于任何可用测量，如可以选择具有最好信噪比（SINR）的eNB。注意，这不是真正的DeNB：常规的LTE eNB至少需要软件升级才能成为donor - capable（捐献能力），因此并不是所有可用eNB都是潜在的DeNB。让网络运营商一整晚升级所有eNB来支持中继节点，是不必要也几乎是不可能的。此外，运营商会选择一部分eNB作为DeNB来降低成本。

然后，当中继节点从OAM系统下载初始配置数据并获知它的DeNB association时，OAM与CeNB的连接会拆除，而与DeNB的连接会重新建立。即使CeNB和DeNB是同一个设备，基于安全性要求（具有不同身份的同一节点应该在两个阶段配置），重新建立也不能避免。

CeNB的概念已经由3GPP作为标准接收，并以“两阶段配置（two - phase configuration）”命名。其中，第一阶段对应中继节点到CeNB的初始附着，而第二阶段对应中继节点最终与DeNB的连接建立。对于DeNB选择，3GPP除了考虑4.1.3.1节中所述的第二种方法，还考虑了其他办法，即中继节点接收潜在目标DeNB列表，并基于其他准则（如最佳信号强度就是一个很好的选择）从中选择DeNB。

4.1.3.3　RN自动连接过程

现在，配置基站的核心概念已经提出，围绕这个概念的中继节点自动连接过程也应该详细阐述。

如果不引入新的接入方法，中继节点连接的惟一方式是像UE一样通过Uu接口连接。因此，中继节点有两个功能：UE功能和中继节点功能。这种双重性也体现在RN需要两个安全标识（安全标识：通用用户识别模块USIM卡），即作为UE在第一阶段用来初始连接的USIM - INI和作为RN在第二阶段连接的USIM - RN。两个USIM卡可以在同一个通用集成电路卡（UICC）里共存，但在特定时间里仅一个USIM卡可以激活。

中继节点的自动连接建立需要中继节点的自配置作为必要条件。启动真正的自动

连接，需要下述准备工作：

1）具体的接入点名称（APN），在这里可称为“APN - OAM”，将 OAM 子网设置为分组数据网络（PDN），由归属用户服务器（HSS，参见 2.1.6.2 节）配置。签约数据作为签约 USIM - INI 的默认 APN。中继节点在第一阶段将使用这个 APN 接入 OAM。对于在第二阶段使用的签约 USIM - RN，PDN 网关（P - GW，参见 2.1.6.4 节）将选择一个不同的 APN 与 DeNB 共存使用。

2）需要一个 P - GW 主管的 APN - OAM，所以应该配置 P - GW 路由可达 OAM 子网。P - GW 中 APN 配置是一个标准过程，只有新的 APN 号选择是运营商专用的操作。第二阶段，根据标准化的中继架构，服务于中继节点的具体 P - GW 与 DeNB 共存。

3）在第一阶段中使用的 P - GW 必须具有 DHCP 中继（IETF RFC 2131）功能，以便使用 USIM - INI 开始自动连接过程。

在第一阶段 UE 的附着过程中，中继节点的 UE 功能在初始附着信元中的标准协议配置选项（PCO）中体现，并稍后利用 DHCP 获得 IP 地址。因此，P - GW 在建立承载时，不会进行自动地址分配，因为它也不需要指示来执行操作。通过从 HSS 获取的 APN - OAM，MME 将中继节点连接到正确的 P - GW 上。此时，中继节点与 OAM 子网已建立了物理层（层 2）连接，但还没建立 IP 层（层 3）连接，所以下一步就是进行 IP 层连接建立。

为了与 OAM 系统建立 IP 连接，中继节点需遵循传统的 DHCP 协议过程（IETF RFC 2131），与 4.1.2 节（参见图 4.9）描述的过程类似。

中继节点的 DHCP 客户端通过无线链路向 eNB 发送 DHCP DISCOVER 消息。在 CeNB 中，DHCP DISCOVER 消息通过已建立的 GTP 隧道发送给 S - GW，并会进一步转发给 P - GW。而在 P - GW 中，DHCP 中继进程会向 OAM 子网中的配置 DHCP 服务器发送消息，且 DHCP DISCOVER 消息就是在该进程中接收的。消息会在 OAM 子网的 DHCP 服务器里处理。如果成功，中继节点会获得 IP 地址（如地址池中有足够的空闲地址）。DHCP 服务器会将 DHCP OFFER 回复给 DHCP 中继，而 DHCP 中继反过来回复给中继节点（以及 4.1.2 节中所述 ACS、CA 服务器和 SEG IP 地址）。

中继节点会配置接收到的 IP 地址，用于进一步的 OAM 相关传输（见图 4.9）。“IP - m”层就涉及 OAM 子网的连接性（IP 地址、路由条目等）。注意，所述“OAM”层为南向管理接口上的 OAM 协议栈。当然，在建立的连接上任何 IP 包都是可以交换的。DHCP OFFER 消息中接收到的其他信息会在中继节点里处理，并且存储以便进一步使用。

图 4.10 介绍了 LTE 回传配置概况，主要描述了相关节点以及中继节点自动连接的连接点。该图描述了 OAM 系统中实施的常规子网分离的方案、独立 IP 子网中的控制平面节点和用户平面节点。加粗实线表示 OAM 接入路径的第一部分，从中继节点到 P - GW。这条路径（与任何普通的 Uu 用户平面传输一样）离开了初始 RN - CeNB 那一跳（在无线中继回传频段），进入到用户平面 GTP 隧道。GTP 隧道在 CeNB 和 P - GW 间建立，为 UE 附着过程的一部分（见图 4.9）。对于从 P - GW 到 OAM 系统

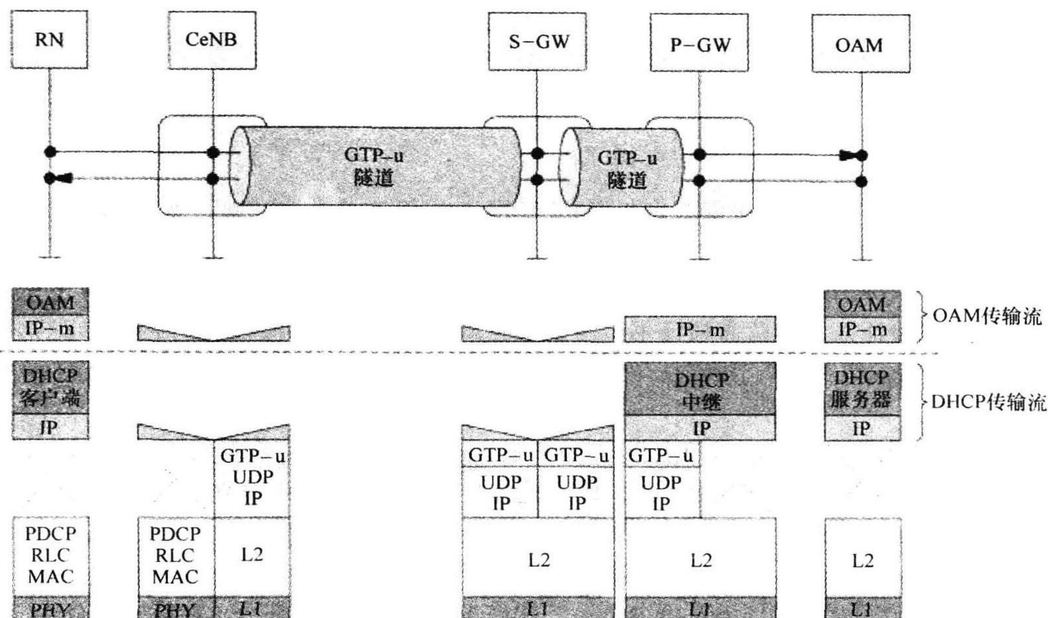


图4.9　DHCP和OAM协议栈（Szilágyi和Sanneck，2011，2011 IEEE允许转载）

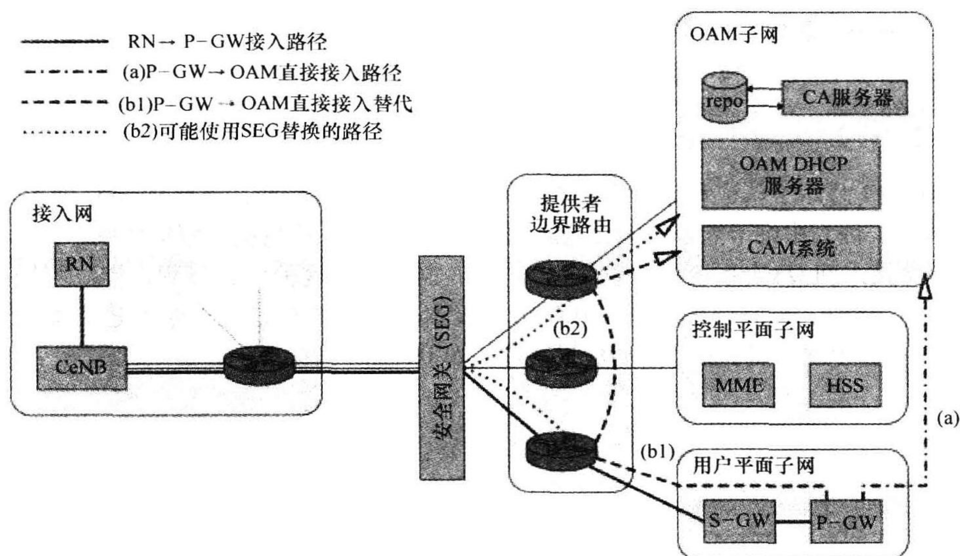


图4.10　LTE回传子网配置（Szilágyi和Sanneck，2011，2011 IEEE允许转载）

的路径，有3种选择，用（a）、（b1）和（b2）表示。选择（a）就是作为外部PDN［就如IP多媒体子系统（IMS）］来接入OAM子网。（b1）和（b2）都是通过同样的设备商边缘路由来接入OAM子网，这些边缘路由用来维持子网分离。不同之处在于（b1）不经过SEG，而（b2）需要经过。

方案（a）、（b1）和（b2）的选择基于网络运营商的喜好和策略。然而，事实上方案（a）不关心网络配置：既然所有的节点（包括 P - GW）都需要接入到 OAM 子网，P - GW 也可以令 UE 接入到 OAM 子网（P - GW 提供适当的已配置 APN - OAM）。

4.1.3.4 安全连接建立

初始连接建立后，中继节点与 OAM 子网建立 IP 连接。接下来，中继节点便要与 OAM 节点建立安全连接，包括第一阶段中自动连接过程的剩余部分，即下载初始参数包括 DeNB 列表。对于这个设置，中继节点需要设备商网络单元证书（与 OAM 相互验证）和运营商根证书。中继节点与 CA 连接，并像普通的 eNB 一样完成证书注册，如 4.1.2 节所述。然后，中继节点会与 OAM 系统建立相互认证的 TLS 会话。

存在两种方法实现中继节点会与 OAM 系统建立相互认证的 TLS 会话：使用 IPsec 和 TLS 或只使用 TLS。选择第一种，IP 层连接是安全的，并在中继节点和安全网关间使用了 IPsec 隧道。这意味着，在图 4.10 中，P - GW→OAM 的路径应采取（b2）方案，甚至要经过 SEG。应当指出，在这种情况下，整个 RN→OAM 的路径会通过 SEG 两次：第一次在 RN→P - GW 部分，第二次在 P - GW→OAM 部分。在第一部分中，RN→SEG 的 IPsec 隧道显然会通过 SEG，路径会在其第二次从用户面子网回传并到达 SEG 时中止。这主要是因为，在第一次，中继节点的所有数据包都会作为负载（包括 IPsec 和上层数据）通过传输网络传输，而此时 SEG 仅作为一个普通的 IP 路由器。换句话说，IPsec 隧道位于用户平面的 GTP 隧道里，跨越 CeNB 到 P - GW。然而，从 IPsec 角度来看，二次连接存在于 RN 和 SEG 之间，不需要考虑 IPsec 数据包的传输路径。

图 4.11 显示了认证和安全链路建立相关信息流。可选地，连接到 SEG 的 IPsec 可以省略，因为中继节点事实上已经通过连接到用户平面子网接入到信任域，并通过 TLS 握手接入到 OAM 系统进行认证。图 4.11 也显示了这种可选过程，惟一不同的是，由于不使用 IP 层安全协议，SEG 不积极参与这次选择过程。通过建立安全的 OAM 链接，中继节点可获取初始配置参数，如 DeNBs 列表。

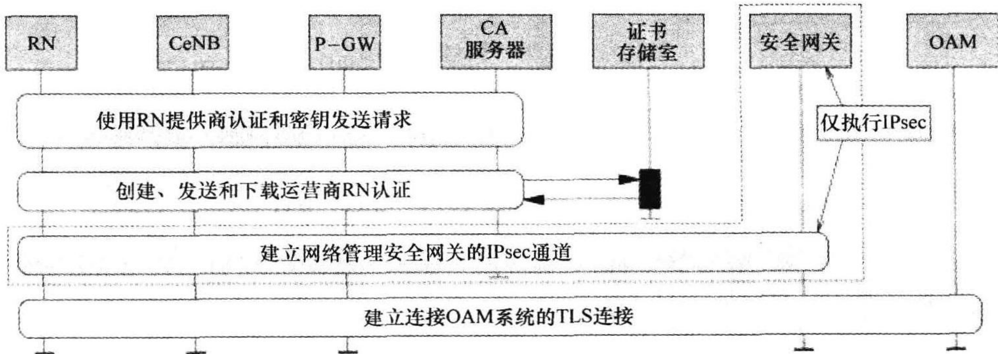


图 4.11 鉴权和安全连接（Szilágyi 和 Sanneck，2011，2011 IEEE 允许转载）

4.1.3.5 切换到 DeNB

当中继节点通过配置 eNB 下载了初始 DeNB 名单后，中继节点会脱离 CeNB 并进入第二阶段。中继节点从第一阶段获取的 DeNB 列表中选择一个 DeNB，并通过中继节点的附着过程连接到这个 DeNB。中继节点的附着过程与 UE 附着过程类似，但还是存在一些重要的不同。在此阶段，中继节点与 USIM - RN 都会使用证书进行 TLS 握手，从而在它们中间建立起一个安全通道；中继节点应该在第一阶段使用证书进行注册。中继节点使用 USIM - RN 来附着网络，并建立与 MME 的非接入层（NAS）安全连接。中继节点的 P - GW 此时为与 DeNB 共存的特殊 P - GW。中继节点已获得的 OAM 子网的 IP 地址路由需要再次使用（毕竟只有层 2 连接发生了改变），因此第二阶段跳过了 DHCP 部分。中继节点会连接到 OAM，继续进行自配置（参见 4.1.2 节）。

中继节点和 DeNB 还会建立无线资源控制连接，以便在它们之间进行资源分配。该无线资源控制协议与 eNB 和 UE 间使用的 RRC 协议（3GPP TS36.331，2010）类似，但还会控制中继链路资源。一般情况下，中继节点必须保持与 SAE - GW 的 S1 连接以及与相邻中继节点（无论是与中继节点本身小区覆盖重叠的中继节点还是 eNB）的 X2 连接。根据不同的中继组网可选方案（3GPP TR36.806，2010），信号连接的精确数目可能也不同；在 S1/X2 结构标准规范书中，中继节点必须维持一个连接 DeNB 的 S1/X2 接口。

OAM 连接完成并且中继链路资源分配完成后，中继节点可以进入运行阶段，为其小区供电并服务接入 UE。在运行阶段，中继节点会应每一个基本需求建立连接，如 UE 附着到中继节点或切换到其他小区时释放与中继节点连接。为传送 UE 业务数据，很多重要的用户平面 EPS 承载会被创建。作为在相邻小区间建立邻居关系的一部分，SON 功能自动邻居关系（ANR）可以在中继节点间或中继节点和 eNB 间创建 X2 连接（参见 4.2.3.6 节）。

所讨论的自动连接方法（Szilágyi 和 Sanneck，2011）已由 3GPP 接收，作为 LTE - Advanced 中继节点通过配置 eNB 然后切换到 DeNB，获得与 OAM 节点初始连接的标准方法。在 3GPP 中，这被称为中继节点的“两阶段”配置（3GPP TS36.300，2010），参见 4.7.6.3 节；原 TDoc 参考 3GPP R3102370。

4.1.4 小结

自动连接可以视为自配置过程中最关键的部分，因为任何进一步的配置步骤都取决于这一阶段的成功。此外，自配置还包括网络单元安全环境的建立，这会影响整个网络单元生命周期的安全性。在安装阶段，网络单元就会准备进行自调试，以实现一个具体规划站点的网络功能。因此，可以仅仅为网络单元提供一个商用的软件和配置文件，就可以实现整个安装过程。网络单元设备商和网络运营商的工作转移到准备（而不是真正推广）阶段，从而减少了制造商和运营商之间的协作工作和尽可能多的调试人员的现场工作。

自动连接和自动调试的通用框架已提出，并包括所有相关的组成部分。由于自配

置过程中许多部分本身高度取决于具体供应商（如软件管理），且只有某些方面的标准化允许设备商不同，实际上自动连接和自动调试的具体实现非常不同［从自配置等级的角度看，它的功能是相关的网络实体（NE，ACS/不同 OAM 系统服务器）、确切步骤顺序等］。

提出的框架同样可以应用到3G，但需要注意 RAT 的具体差异：在执行 NB 自动连接前，RNC 作为自有网络单元需请求自配置。至于自动连接，相比 LTE 来说，可以使用其他传输网络技术（如 ATM），这可能既需要自有自动连接程序还需要一些额外的预配置。一个新基站的自动调试也包括 RNC 相应配置（小区、邻区、传输配置）。

4.2　动态无线配置

传统基站的无线配置完全基于一种严密的规划，这就要求网络运营商在安装前利用规划工具完成一系列的规划工作。在逐步建立无自配置功能网络的过程中，每当有新的网元嵌入时可以进行劳动密集型的无线规划，或预期在下一个时间帧内有新的基站嵌入时定期进行无线网络规划更新。在第一种情况下，基站的嵌入顺序必须严格按照规划进行。而在后一种情况下则需要接受这种不能及时表征某一个特定时间点下正在运营的网络现状的规划。当缺少一个具有表征性的规划时，新嵌入的基站和其相邻基站无法实现符合当前的网络拓扑的正确配置。而当使用“动态无线配置（DRC）”时，则无需这种权衡，因为 DRC 是能够适应当前网络拓扑环境的。DRC 将使用这样一种方式配置新的基站/单元和它的邻站，它的关键无线配置参数（物理单元 ID、邻站关系、初始功率和倾斜设置）都是在运行过程中进行正确配置的，因此能够以更加特设的方式进行部署。在 2.2 节中描述过的未来的部署方案将更加需要这种灵活的部署方式。总之，这种灵活性使运营商能够更快地针对时刻变化的用户需求和竞争对手的情况做出反应，赢得自己的商业优势。

尽管它仍然需要在标示尺寸和容量方面进行规划来选址和决定需要安装的硬件资源，但这种精细的无线网络规划可以忽略，因为相应参数的赋值已经转移到 DRC（见图 4.12，比照图 4.1）。离线的无线网络规划工具完全依赖于运营商（如预期的地区性的通信量分布）所提供的输入，而 DRC 算法可以利用测量值和正在运作的相邻基站间的最优化参数完成规划。

无线网络参数分为两大类（3GPP S5－091879）：

1）A 类参数对相邻单元间的配置没有影响，反之亦然。因为它们的赋值独立于现有的网络拓扑，即在 DRC 的范围外赋值。

2）配置正确的 B 类参数需要了解相邻基站间的关系和配置（包括直接相邻的基站，相邻基站的临站，甚至在一个大的地理区域中的所有小区）。由于这些参数值是依赖于当前网络环境的，这就需要动态地给它们赋值。B 类参数可以根据表 4.2 中的定义进一步划分为几个子类。

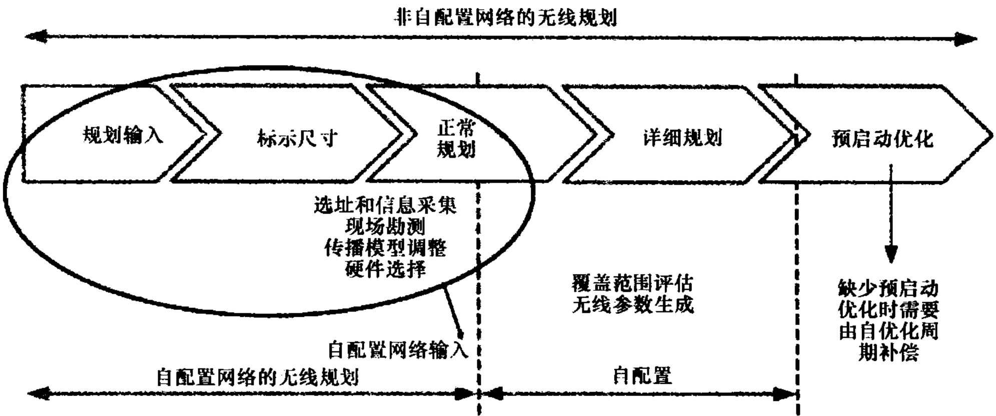


图 4.12　无线规划到动态无线配置的功能转换

表 4.2　无线参数分类

子类	定　义	描　述
A	单一小区规模参数	
A1	A1 类参数可以有一个固定值或者根据相同小区的动态属性设置，比如小区中的用户数	最初可以配置一个任意的、默认的或流量模型的派生值。参数值根据小区类型（城市、乡村、公路、室内等）而定。也可以从网络中的已优化小区得到。如果需要，在小区运营时，这些参数可以在很短的优化周期内实现自优化 这些参数包括许多非 DRC 参数，大约 80% 的无线参数属于这个子类 如 RRC、RRM、QCI、调度器和 HARQ 参数
A2	A2 类参数依赖于相同小区的半静态属性 这种依赖是静态的	这些参数可以配置为某种规范或标准。一个典型的例子是循环前缀长度。当小区半径超过 1.4km 时循环前缀长度可配置为“扩展型” 只有少数无线参数是这种类型。原因是，在信息建模时已经考虑了这些配置参数之间的依赖关系。基于这个原因，这种类型的参数没有被进一步考虑
B	多个小区规模参数	
B1	大部分甚至整个网络的 B1 类参数设置的值应当一样	这些参数是 read - create 类型的，无法优化 这些参数值不能动态分配，因此需要移动网络运营商指定。它们可以作为在线数据库准备阶段的输入。因此此类参数不在 DRC 范围内 如 PLMN ID、频带、EARFCN、#PRB
B2	B2 类参数的值在整个网络范围内都是惟一的	这些参数为 read - create 类型，无法优化 这些参数的值由 DRC 指定。尽管有时需要网络宽输入，该算法依旧不失简单性 比如站点 ID、EGCI 和基站名

（续）

子类	定　义	描　述
B3	B3 类参数要无碰撞地进行配置，这意味着所有直接相邻小区的参数配置值不能相同	配置不同 B3 类参数的算法非常相似 这些参数实际应用时经常附加一些限制 并非所有的 B3 类参数都需要初始化配置。当小区间干扰协调功能开启时，仅仅需要对小区间干扰协调的子带频率进行配置。但这个功能不会在新的小区中启用 在 DRC 范围内的例子是物理小区标志、物理随机接入信道的根序列（RS）指数、小区特定的 RS 循环移位（RS－CS）
B4	B4 类参数的值必须与相邻小区的配置协调一致	相对于 B3 类参数来说，并不是所有的 B4 类参数都在 DRC 的范围内。一些可以配置为一个默认值
B4. 1	B4. 1 类参数的值必须精确地和一个相邻小区协调一致。对于这样一个参数，可以在小区间定义一个一对一的对应关系	在 DRC 范围内的例子是相邻小区关系和小区重选的特性补偿
B4. 2	B4. 2 类参数的值必须和一个小的小区簇协调一致。对于这样一个参数，可以在小区间定义一个一对多的对应关系	在 DRC 范围内的例子是跟踪区域、发射功率和天线倾角

这个状态图（见图 4. 13）阐明了 DRC 中已执行的单个算法以及它们的中间输出和内部相关性。这些算法在以往算法的（中间的）结果上做了进一步的改进。中间结果不再作为基站的直接配置参数，而是作为自我配置算法中的必要输入。统计图中的所有进程组成了一个单一的自配置算法。

图 4. 13 的左侧列出了 DRC 的输入，这些参数的具体分组如下：

1）设备参数（库存管理）：这组参数收集了已安装基站的设备属性，如硬件配置、不同硬件组件的类型和厂商以及相关的特性，如天线的增益、功率放大器的限制。站点上安装的硬件配置属于网络尺寸规划。

2）安装测量：安装基站时需要进行自动或者手动测量。这些测量值可以存储在基站或者一些中央数据库中。典型的例子如地理位置和馈线损耗。

3）站点和测量环境参数：这些参数包括已经安装的 eNB 站点的属性，如站点的标识和杂波类型。其中一些参数可能会进行自动分配（如从数字平面图中提取出来的杂波类型），但绝大部分都需要手动配置。

4）网络拓扑、状态和性能：包括网络中已经存在的单元的地理位置、运行状态和性能。这些输入值代表着当前网络的环境，对于增量式网络的发展方案来说是必不

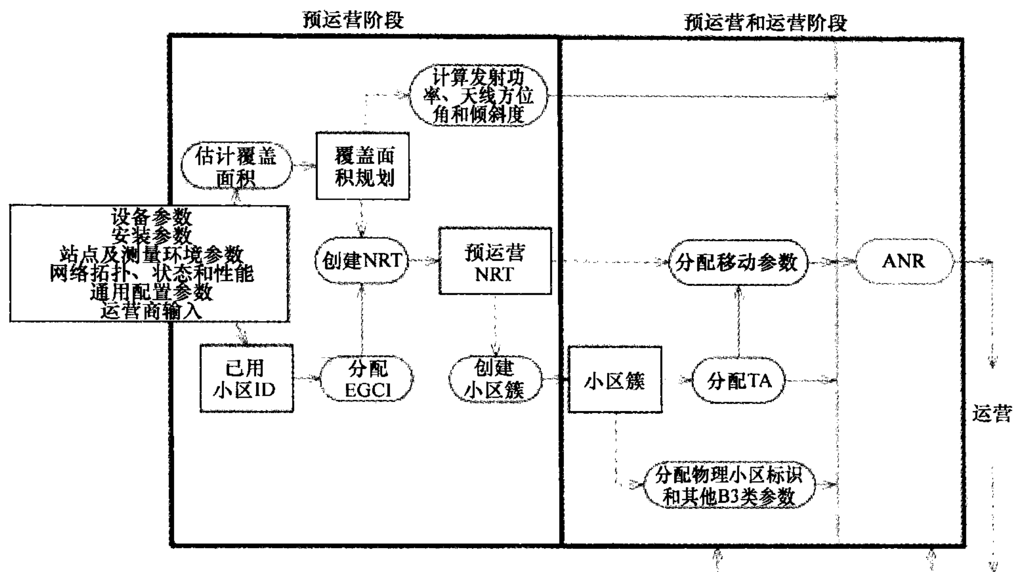


图 4.13　DRC 的过程和算法

可少的。

5）通用配置参数：包括网络中新单元和已经运作的单元的 A 类配置参数。对于新的单元来说，这些典型的配置参数来自于自动调试阶段规划，如频带、信道带宽等。

6）运营商输入：远程专员提供输入来控制自配置过程（如如何计算物理小区标识的策略，比照 4.2.2 节）。

在这个过程中包括以下中间输出和参数分配算法：

1. 覆盖范围

包括计算新插入的小区的覆盖范围以及重新评估已投入运营的小区的覆盖范围。覆盖范围的计算可以基于使无线电波传播模型所估计的路径损耗与链路预算相匹配获得，类似于详细的无线规划可以使用离线的规划工具实现。如果基站支持的话，该算法还需计算相关的下行链路发射功率、远程电下倾和远程方位角转向。它们定义为以最小辐射功率来实现相邻小区间的最佳重叠。当尺寸规划显示小区覆盖范围有容积限制时将作为算法的额外约束来处理。

假设在已经存在的小区间插入新的小区，那么这些相邻站点的覆盖范围将会减少，它们的无线参数要重新计算，并且这些基站也要相应地进行重新配置。

2. 维护邻区关系列表（NRT）

维护邻区关系列表包括了插入小区的潜在相邻小区。DRC 需要构造一个前期运作阶段的邻区关系表，因为这对于自配置算法的改进和基站间的连接设置来说是必不可少的输入（3GPP X2 接口）。此功能是对自动邻区关系建立功能的补充（ANR），比照 4.2.3 节。

维护邻区关系列表的生成算法将依赖于对新的小区和这些小区任意角度内一定地理距离之内的所有小区覆盖范围的评估。紧接着，基于小区重叠范围的小区覆盖范围的关系就确立了。

3. 小区簇

一个小区簇（见图4.14）由新插入的小区、新插入小区的所有相邻小区（第一层邻区）和相邻小区的邻区（第二层邻区）组成。所有在小区簇中的小区由 E－UTRAN 全局小区标识和物理小区标识所确定，每个单元都被给予附加的限定来区分它是第一层邻区还是第二层邻区。

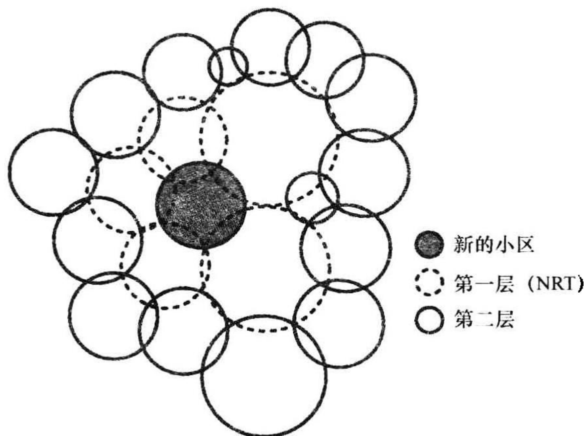


图4.14 小区簇示例（Sanneck 等人，2010a，2010 IEEE 允许转载）

由于基站不会和小区簇一起配置，小区簇是一个典型的中间配置结果，但对于别的需要远程小区信息的自配置算法来说却是必不可少的输入，如物理小区标识分配算法。执行这些算法时，甚至第 n 层的邻区（$n>2$）都有可能包括在内。这种小区簇是由新插入小区（包含第一层邻区）的 NRT 开始构造的，并遍历了邻区的 NRT，直到收集到预期规模的邻区关系。

4. B3 类参数

B3 类参数有一个取值范围的限制。因此相同的值需要分配到整个网络中的多个单元。所有 B3 类参数都需要无冲突地进行配置（见表4.2），这意味着参数的配置值必须不同于它的所有邻区的配置值。

5. 跟踪区域

为了始终得知移动设备的位置来达到寻呼的目的，E－UTRAN 划分为连续的跟踪区域（TA）。每一个小区必须分配一个跟踪区域码（TAC）。通常跟踪区域是规划专家基于对这块区域通信量走势的理解手动分配的。

TA 的大小受限于寻呼信令负载和位置更新负荷间的权衡结果。通过流动性和通信预测模型，可自动进行位置区规划。这些模型通过计算小区边界的穿越频率和寻呼负荷来分配位置区以获得最佳的信令开销。典型的输入包括含有小区和高负荷路径的地理图、人口分布、用户移动性、寻呼流量模型以及寻呼和位置更新的相关资源损耗。

针对上面的情况，有一种临时的分配算法可供选择。例如，当要保持一个TA的规模限制时，一个新的小区可以分配给相邻小区的TA。在S1口的自配置过程中，基站的TA自配置信息将发送给移动管理实体（见8.2.1.1节）。

因为递进的分配法可能会导致跟踪区域边界的次优位置，因此需要定期进行跟踪区域的自优化（见8.2.4.2节）。这种优化也应该考虑到需要重新配置其他受影响的小区，因为一个跟踪区域的重新配置可能影响很大一部分网络。

如图4.13所示，步骤（1）和（2）只属于预运营阶段，而步骤（3）~（5）将同时在运营前和运营阶段执行。此外，步骤（1）在LTE网络中将会以一种静态的方式来执行，也就是说，在网络规划时预先计算好，而不是在基站插入时动态地执行。

按图4.13中所述的顺序，接下来的内容将分别介绍功率以及天线设定值的自动分配和物理小区标识与ANR的建立。4.2.4节将总结DRC整体架构上的注意事项。

4.2.1 初始传输参数生成

本小节负责对新引入的基站分配无线传输参数，这些参数具体有最大传输功率、电气天线斜率以及电气天线方位角。根据表4.2中定义的参数类型，所有的参数均落入B4.2类，因此所有的参数都需要以一到多的对应关系对齐到小区簇内。这些簇的大小取决于网络布局，其中很多还包括等级的邻区以及不同层（宏、微、微微、毫微微层次）的对应小区，而不是新近引入的基站。

对这些参数的配置有3种主要选择：

1）在站址安装之前或者正在安装时，用完全由网络规划设定的数值预配置这些参数。

2）对有默认数值的参数预配置的情况，基站一特定站址值在运维阶段利用覆盖范围和容量优化随机生成，具体内容可参阅5.4节。这些默认数值可能是标准的或者最优算法的数值，它们取决于诸如基站类型（宏、微、微微、毫微微）、位置（城区、郊区、农村）和制造商。

3）对无需预配置这些参数的情况，基站和特定数值在自配置过程中自动确定。基站就可向网址递送数据，而完全无需上述参数。

第一个选项代表了使用离线工具的传统参数计算和校准方式。第二种选项通过定义通用默认数值避免了这一操作（相对来说，这可能不是最优方法），而把特定站址的自适应转移到运维（自优化）阶段。一方面，由于在初始设置重新使用了简单的自优化功能使得该方法很有吸引力；另一方面，收集“好”的参数设置可能耗费较长时间。

只有第三个选项属于DRC类别，这意味着参数分配算法为在线方式，并仅考虑小区簇而不是整个网络域。这就允许快速、动态地分配参数，然而与整个域内完全的离线计算相比，该方法的结果可能不够精确。然而，目标是产生“足够好”的配置，在此结果上，自优化算法可以有效持续，且自适应过程需要的时间比第二种选项更少。

为均衡覆盖范围和容量，传输功率、斜率、偏振角的设置之间密切相关。进一步说，这些参数也需要根据周围基站进行调节。因此，对于第三个选项来说，已经存在很多潜在的可以完成如何确定这些参数的策略。随后，我们提出策略A范例，该策

略中全部3个参数都需要调整。简化的策略B中，传输功率设置成预先计算好的数值（如通过网络规划），然而斜率和方位角在覆盖范围和干扰目标实现后再进行调整。

4.2.1.1 策略A：完全确定传输参数

该方法中，传输参数值在新基站（软件设置、S1接口连接建立、OAM连接建立）调试完成之后，且在无线设备开启之前，由集中算法计算得出。该算法使用了新基站所有可能利用的信息，包括诸如站址ID和分流模式、频带、信道带宽、无线传播模型等，如图4.15所示，这些信息还来自相应的邻区。因此，事实上，策略A

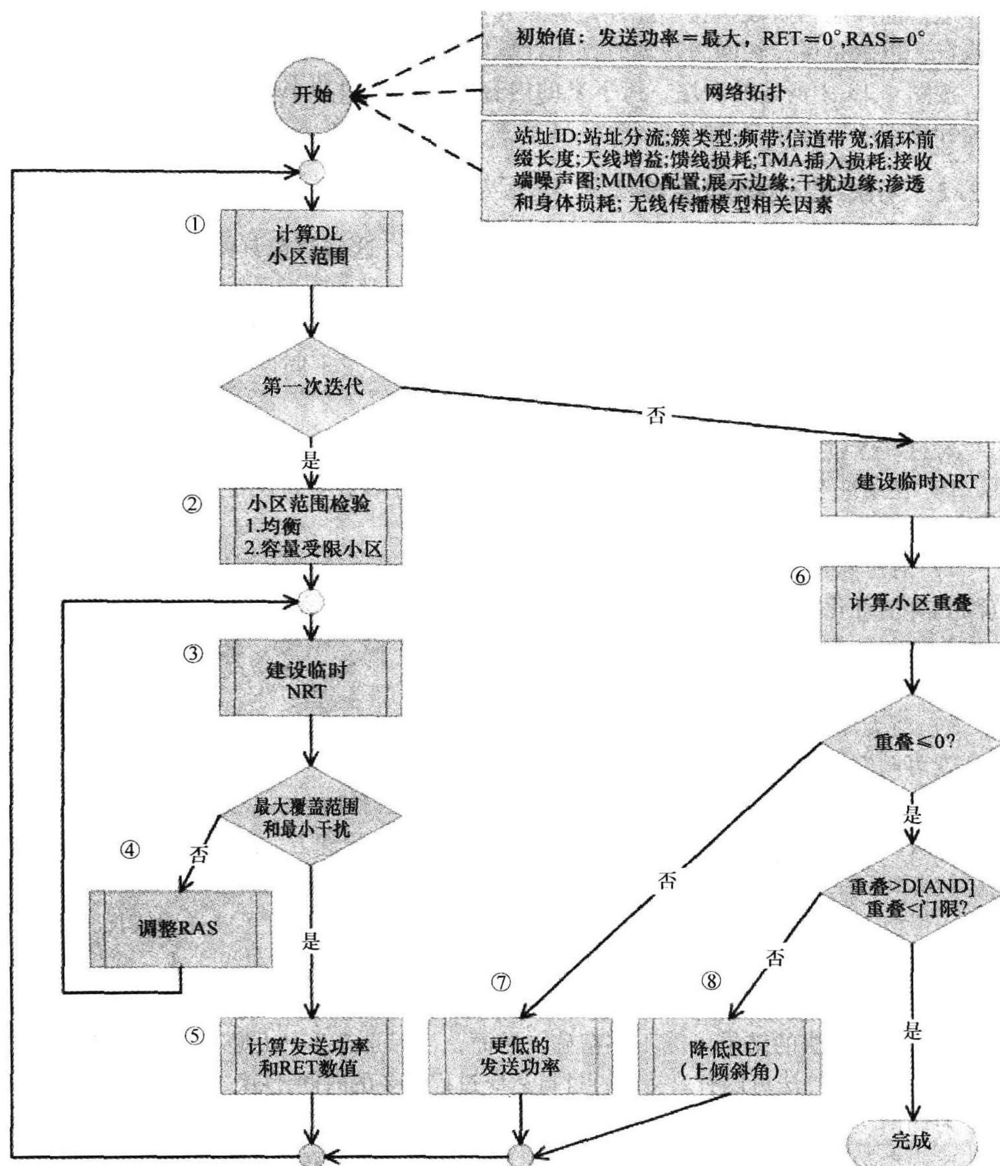


图4.15 插入策略A：调整所有传输参数

可以描述成在无线设备开始运行之前，把相应算法从离线网络规划（预先看选项1）移动至实施点，这样做的好处是算法（也就是当前网络配置）中的所有输入数据都是最新的。

为了计算数值，随后介绍了两步方法：第一步计算传输功率；第二步计算天线斜率和方位角。事实上，新基站的数值开始于最大覆盖区域，并且该覆盖区域随着存在/相邻小区交叠区域逐步变小而变化。

算法以最大可能小区范围开始：

1）发送功率（Tx功率）=MAX，注意，算法开始值“MAX”可能低于实际可能的设备最大值，如容量受限的小区。

2）远距离电气天线斜率（RET）=0°。

3）远距离方位转向（RAS）=0°。

4）[选项：位置小区]→RAS：基站对应所有小区的方位角转向可以协同运行。

5）两个小区的重叠区域太大→通过逐步的调整Tx功率和天线斜率，缩小新基站的小区：

① 新插入小区、邻区或者两者兼有；

② 集中注意基站内小区关系。

通过计算eNB间的重叠部分来获得Tx的功率和天线斜率估计值。计算最优Tx功率的迭代过程是以大的Tx功率值开始，随后每次迭代过程中降低该值，直到不再交叠。随后，为补偿覆盖范围损耗，调整天线斜率。在计算天线斜率时，天线斜率的初始值是最大可能下倾角。接下来，在算法的每一次迭代过程中，天线斜率的值都会增加（上倾角），直到实现基站内相邻小区最小小区重叠。图4.15描述了该算法，随后给出了细节解释。

1）对于新的小区，计算DL最大可能的小区范围R，通过把Tx功率设置成最大的可能值，完成PA传送、天线斜率和天线偏振角设置到0°的操作。

2）在最大小区范围内，执行两种校验：第一个是校验DL和UL间的均衡，以保证两者的覆盖区域互相匹配；第二个是把计算得到的最大小区范围和运营商定义的最大小区范围相对照。后者在小区容量受限时完成。如果其中一个或者两者都校验失败，需要降低小区范围，通过降低Tx功率值完成此操作，不改变天线参数。一旦发现匹配两种条件的Tx功率的合适数值，在算法的后续步骤中就不必完成这些校验。这是因为算法将会进一步降低初始小区范围值。

3）在第一步和第二步中计算得到的小区范围中，构建临时NRT。可以从表格中除去基站内小区关系，因为其无需进一步计算。

4）确定RAS数值。在算法中该步骤可以依据基站是否支持RAS来选择。如果基站不支持RAS，该步骤就可以跳过，在下一步中使用机械安装方位角。调整新基站方位值，以便最大化覆盖范围且最小化干扰。当前做出两种假设，以用于进一步仿真验证。首先假设方位角转向是协同的，这意味着包括基站在内的所有小区的方位角都按照协同的方式转向，因此基站间的相互依赖性更多或者说不固定了。如果调整一个小区的方位角，属于相同基站的其他小区的方位角需要以相同的方式调整。第二点，只

有新插入的小区方位角需要调整。后者是因为当调整已经运行的小区的方位角时，通过网络的传播效应将十分显著。在每一次迭代中，应该重新估算 NRT。

5）通过计算小区范围和方位角数值，可以计算新插入的小区和已经运行的小区的重叠范围。根据该重叠值，可以提取出小区插入场景。该操作的精确度权衡在今后的标准化中有待研究。例如，如果重叠 >90% 的小区覆盖范围，很明显是小区分割场景，如果重叠 <10%，则明显是小区驱动场景。当然并不是所有的情况都很明确，然而可以认为小区插入场景是与众不同的。算法的开始值根据小区接入场景决定，这包括新小区以及已运行小区的初始值。尽管在单纯的覆盖驱动场景（例如，重叠 <10%）下，已运行小区使用算法的初始值可以和当前配置数值相同。在小区分割场景中，发射功率可以是新插入小区和已有小区间的平均值。发送功率的最大可能值在第一步和第二步中确定。算法将会以较大的 Tx 功率值开始，并在每次迭代中逐渐降低该值。对于斜率值，最大可能的下行斜率可以作为初始值使用，算法将会迭代地增加该值（上倾角）。

6）有了发射功率和天线斜率的初始值，NRT 内所有小区的覆盖范围就可计算。同时，所有小区间的重叠就可以计算得出。

7）下一步是计算发射功率。此操作通过逐渐降低该值完成，直到新插入小区和现存已运行小区间无重叠区域。每次迭代过程中使用的发射功率步长有待进一步标准化。另外，这些计算的范围可以只在新插入的小区内进行，也可以包括已运行的小区，这取决于小区插入场景。

8）最后，在完成方位角和发射功率的计算之后，可以计算天线斜率。这也可以通过迭代和逐步向上调整斜率值来完成，直到新插入小区和现存小区的重叠区域大于 0，且低于运营商定义的门限值。因此，斜率配置可以补偿由低发射功率值导致的覆盖范围损失。

4.2.1.2　策略 B：预先计算传输功率

SOCRATES 项目（Eisenblätter 等人，2011）提出了软集成概念，旨在以最小的干扰，把新基站逐渐集成到运维网络中去。另外，该算法在新基站完成初始化试运转后启动，但策略 A 中的算法是在新基站的无线设备启用后启动。以网络规划中预先计算的数值为开始点，软集成使用来自网络或用户的信息确定新基站的最终配置。这通过逐步增加新基站的无线参数实现，并允许周围基站通过自优化过程适应各自的传输参数。仿真中把最大传输功率作为驱动无线参数，把电气天线斜率作为待优化参数。事实上，由于决定最终配置的机制与相应的自优化机制密切相关，软集成在自配置和自优化过渡之间进行操作。该方法对容量驱动场景最敏感，这是因为在覆盖驱动的场景下，来自邻区基站或者 UE 数据可能不足以用来验证新的设置。

1）最低可能小区范围算法：

① 发射功率 = MAX，注意，算法初始值“MAX”可能依赖于基站类型、现存的环境或者来自网络规划的预计算数值。

② 远程电气天线斜率（RET）= MAX（最大化可能下倾角）。

③ 远程方位角转向（RAS）= 0°。

2）位置小区→调整 RAS：在 SOCRATES 项目中没有仿真，而作为逻辑步骤。

3）用当前的设置检验/仿真区域，用当前安装情况检验干扰：

① 如果覆盖范围不够，则通过一步增加 RET。

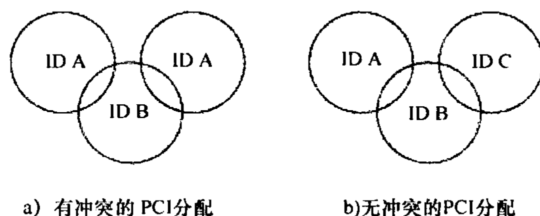
② 调整邻区的发射功率/RET（依赖于只有直接邻区或者若干层邻区算法）。

4）在达到覆盖范围目标之前，返回之前的步骤。

4.2.2　物理小区标识分配

LTE 参考信号序列是 LTE 无线配置的一个基本参数，被称为物理小区标识（Physical Cell ID，PCI），并且是用于物理层上的地域的惟一标识。这些参考信号序列能用作标识符的原因有两个：首先，它们可通过一个短时帧（5ms）读取；但更重要的是，其鲁棒性结构可对抗干扰，对标识的可靠性来说尤其重要。物理小区标识的自动配置是 3GPP 标准（参见 3.23 节）中定义的关键 SON 用例之一。

PCI 构造的出发点是 168 个伪随机序列，也就是“小区标识组”。每个小区标识组由三组正交序列构成，所以在 3GPP TS36.300（2010）中共有 504 个可用 PCI。显然在 LTE 网络域中不止有 504 个小区，所以需要复用 PCI。PCI 是 B3 类参数（见表 4.2），因此需要以“无冲突”的方式配置，即“邻小区”需分配不同的 PCI。邻小区在此定义为小区集，UE 在特定的区域可以接收到，也就是小区集有一些重叠的区域。但由于用于切换管理的邻小区关系表基于 PCI，所以合理的分配也需满足“无冲突”分配。无冲突分配就是网络中的小区的邻小区与本小区的 PCI 不相同。UE 的小区切换请求由其特定的 PCI 确定。当有冲突时，相关基站将不能有效地识别目标小区，并导致切换的失败。图 4.16 显示了有冲突和无冲突的分配。



a）有冲突的 PCI分配　　b)无冲突的PCI分配

图 4.16　有冲突和无冲突的 PCI 分配

不同的运营商对网络中如何分配 PCI 可能持有不同的观点。为了更好地解决“资源受限”的问题，需要采用一种高效的复用方法。在这种情况下，就需要使用尽可能少的 PCI 进行分配，并且相同的 PCI 需多次使用。当然，也有一些其他的 PCI 分配策略，比如可以按照具有相同 ID 的两个小区彼此间的距离需最大化的方式分配 PCI。

虽然，由于有 504 个可用 ID，无冲突和混叠的 PCI 分配的复杂性看似合理，但 PCI 分配的影响还应从以下方面考虑：小区 PCI 的每一项重配可能都需小区的重启，甚至相关基站的重启将会导致服务中断。因此理解 PCI 重配的原因是很重要的，一方面需要可靠的重配，另一方面需提出一种积极避免这些原因并减少重配次数的方法。

4.2.2.1　相关无线参数

其他无线参数的配置直接依赖于 PCI 配置。分配到的 PCI 直接影响一个小区的上行和下行参考信号的结构（3GPP TS36.211，2011）。尤其是当使用联合波束成型的协作多点传输时，邻小区的下行参考信号应彼此正交。由于有 6 个子载波组，需采用 N_{ID} mod 6 的分配方法，这里 N_{ID}表示所分 PCI 的数字表示。在上行参考信号中，定义

了30个序列组。邻小区不应分配相同的序列组，也就是需根据 N_{ID} mod 30 来为邻小区分配不同的 PCI。这是一个网络中由 PCI 配置推导出的其他配置参数如何影响 PCI 配置需求的重要例子。

4.2.2.2 邻小区关系的改变

对于非运营网络中的初始分配来说，有充足的时间来评估每个小区的规划和理论上的邻区结构，并采用无冲突、无混叠的方式分配 ID。但是，在实际使用中很有可能并不是所有的小区都得到这样的规划，并且由于无线传输的变更特性而很容易改变，典型的现象有不同季节的变化、建筑的改变，或者是新建筑的建造。这样的网络布局规划偏差和相关的配置偏差只能在网络的实际运营阶段才能检测出来。

这样的错误配置无论什么时候发现，都会导致一个或者多个小区的重新配置。

4.2.2.3 网络演进

除了难于在运营前的阶段确定实际网络布局外，随着时间的推移，小区结构的布局也随着网络的演进而变化。添加新的小区可以用来去除覆盖漏洞或在容量负载热点的地方提供更大的系统容量。当有更大的小区提供覆盖时，小区或由更小的小区集代替，或直接删除。

另一个需要特别注意的重要情况是在 LTE 网络运营的前期，只会有 LTE 岛部署，特别是在需要高容量的地区，如机场、商贸中心或大都市。这些岛以步进式扩展，直到覆盖到整个区域。为了正确配置添加到这样岛中的小区的 PCI，需要分析邻小区的 PCI 分配。分析结果用于保证新引入的小区 PCI 不会与任何邻小区发生冲突。但是，尤其在新小区添加到现有小区集群中时，新引入的小区很有可能已经与两个或更多个小区使用相同 PCI，如图 4.17a、b 所示。在网络演进发展的同时，需尽快检测并解决这样的配置错误。

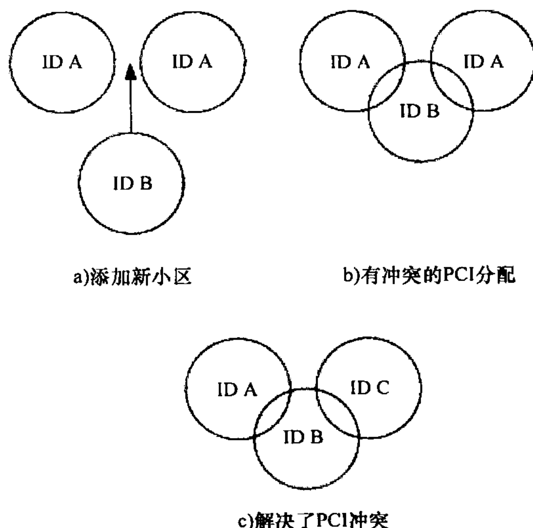


图 4.17 有冲突的插入小区（和解决方案）

混叠概率在多个部署岛覆盖范围重叠时增长。每个岛已配置为无冲突和混叠状态，但如果相同的 PCI 用在所有的岛中，小区连接发生冲突的概率将非常高（图 4.17 所示为 PCI 配置为 B 的新小区与两个之前未连接的岛连接，这两个小区 PCI 均配置为 A）。

冲突和混叠的另一个来源是当一个包含多个小小区的高容量岛，且这些小小区是一个较大的宏小区的补集时（参见 2.1.8.5 节和第 10 章异构网络）。这些宏小区有较大的覆盖范围，并包含一些小小区。在岛屿部署的 PCI 分配拥有很高的复用率的情况下，更大的小区集会导致新的宏小区的混叠。

不考虑新小区混叠的原因，除此之外的所有引起混叠的小区都需配置新的 PCI。图4.17显示了从引进一个新小区到完全解决的混叠问题的过程。

4.2.2.4　通过 ID 空间划分减少可用 PCI

有很多原因解释为什么只采用整个 PCI 集的一个子集来进行分配，而不是选择整个可用的 PCI 集。为了提前避免一些重复的重新配置（和引起的服务中断），网络运营商可将一些可用的 ID 空间分割为独立的小块，并使用它们进行分配。保留的 ID 集可用于不同类型的小区，如宏小区块、微小区等。尤其是用于闭合用户组（Closed Subscriber Group，CSG）微小区时，3GPP 定义了为特定 PCI 组专门保留的可能（3GPP TR36.902，2011）。这是专门用于微小区的 PCI 子组，用于降低 UE 的功率消耗。微小区广播更多的信息以使得用户检测出潜在的目标小区并避免 CSG 预占尝试导致的 UE 无权接入。广播信息包含 GSG ID 以区分特定的 CSG 和接入比特。在不同的接入方式中，接入比特可以不同，如 CSG，可以支持公开和混合。这些信息可通过 UE 的数据采集获得。为了避免此类测量，Wu 等人（2010）提出了使用 PCI 组来认证区分微小区和其接入方式。

如果在网络中使用来自不同设备商的网络单元（NE），则需要对所有 NE 使用单一的网络管理（NM）系统（参见4.2.4节），PCI 的分配可调整为 NM 级，不同设备商的 PCI 配置均使用自动无线配置功能（ARCF），其为定义的自配置管理集成参考点（IRP）的一部分（3GPP TS32.502，2010）（见图4.6），但是 ID 组也需分配到不同的网络。在不同的管理系统同时使用的情况下，负责设备云的每一个系统都需要分配一个单独的 ID 组。这样的 ID 范围分布避免了跨设备商的 PCI 配置协调问题。

使用 PCI 组的另一个重要原因是存在位于频谱授权边界位置的小区。在这样的区域中，无冲突的 PCI 分配需考虑在相同频率上运营的邻区网络。移动网络运营不可以影响其他邻区网络的 ID 分配。因此，他们需就运营商的配置和 PCI 组在边界小区的使用达成共识，所以需要进一步协调。

上述已经列举了将可用 PCI 分成子集的很多原因，但提出合理的 PCI 子组划分方法仍是一项复杂的任务。至今，还没有一个最终的解决方案，这一领域的研究仍在进行。尤其在引入微小区后，静态的 PCI 分配显得尤为不足。研究试图找到一种动态的子划分方法以满足网络的需求。Lee 等人（2009）举出了如何随着微小区数量变化动态保留 PCI 组的例子。将可用的 ID 分割为更小的 ID 组得到的结论是要重点思考 ID 分配的方式。需为小数量 ID 的分配提出一种可应对于尤其是引入新小区时小区布局改变的一种策略，在很大程度上不需要对已有活动小区的重配。

下面的内容将总结根据所有影响因素推导出的分配规则，并展示一些可用于 SON 的不同分配方法的例子。

4.2.2.5　PCI 分配规则

为了得到 PCI 更好的分配，需考虑一些更好应对网络布局变化的情况，也需满足一些其他的需求。

1）无冲突和无混叠分配：这是 PCI 分配最需要重点考虑的一个满足条件。

2）避免重配：新小区的引入或者现有小区的移除需要不引起其他小区的重配。

对于不可避免的重配，重配的数量应达到最小化。

3）适应不同的网络部署：并没有一个万全的配置策略，但使用的分配策略需考虑到适应新小区和周围网络的实际环境。

4）适应于初始化和演进部署的情景：在运营网络演进的过程中，当 PCI 分配到新的网络部署或新小区中时，需要没有太大的区别。所使用的方法应该相同或者至少要基于同样的原则以得到类似的结果。

5）特定的物理层（如 N_{ID} mod 6 和 N_{ID} mod 30）和运营商的政策限制。

4.2.2.6　分配方法

下面介绍了适用于 SON 网络的不同 PCI 分配方案。每个方案都侧重于 PCI 分配的不同方面。

1. 基于地图着色的集中式方法

满足现有需求的 PCI 分配方法在 Bandh 等人 2009 年和 2010 年的研究中做了介绍。

该方法的基本思想是将 PCI 分配问题映射到已知的数学和计算机问题中，这使得 PCI 分配甚至可以在完成之前就能评估出其特性。例如，在给出一个所需 ID 数量的错误假设的情况下，可以事先评估其可能与否。此外，解决此类问题的算法和方法也适用于此种实现方案。

第一步，已知小区和其邻小区需转换成地图的形式以反映冲突和混叠的条件。图 4.18 表示了一个 5 个小区的网络。覆盖重叠区域的小区视为邻区。

小区的邻区关系认定由网络规划中的覆盖区域评定来进行评估，可通过测量来改善（4.2.3 节介绍了 ANR，或者驱动测试）。

1）无冲突：在地图上，把所有小区描绘成节点来反应邻区关系。

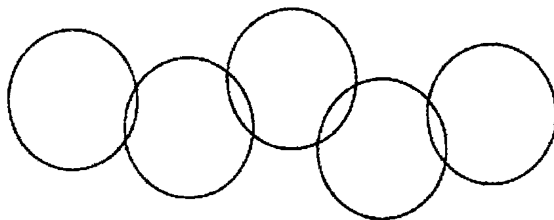


图 4.18　网络层案例

2）无混叠：对于无混叠的分配，地图需延伸至节点与其所有邻区的更多边缘区域。图 4.19 显示了图 4.18 所示的小区分布。

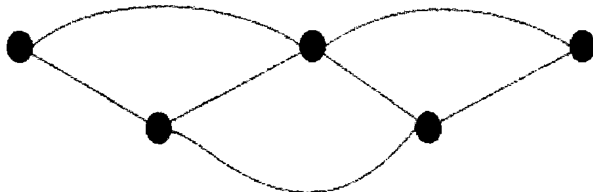


图 4.19　相邻小区间小区边缘的分布情况

图 4.20 显示了一种基于地图着色算法的无冲突、无混叠的 PCI 配置。

该方法特别适用于非运营网络的 PCI 分配初始化和在网络运营阶段不需为新小区分配 PCI 的网络。因为分配的重新计算会引起大规模的重配，并伴随着服务中断概率

的上升，此方法定位于提出一种可保持地形特性并最小化潜在重配区域的算法。

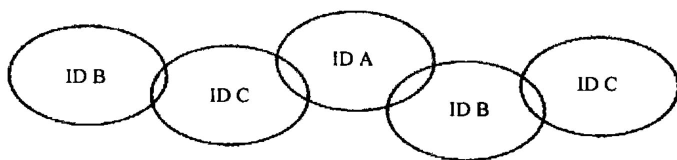


图4.20 有冲突和无冲突的小区分布

剩余的重配建立在PCI独立分配到新小区的基础上，并且这个新小区可能已经发生了混叠，重配需解决这样的混叠。基于地形的方法保证了需要重配的区域要受到直接邻小区的限制。

Bandh等人（2010）将此方式延伸，以避免由于结构变化导致的新邻区关系的重配，如建筑的改变影响了小区的无线传输。

如果使用密集型的分布式PCI，那么这样的邻区关系就会引起重配。安全边界的引入在不增加PCI配置的同时，避免了这样的重配，而不是通过使用更多的PCI空间分配。从Welsh和Powell（Welsh，1967）的研究中可知，地图上所需的颜色的最大数目与地图上的邻区节点的数目直接相关。安全边界增加了邻区的数量。网络运营商在选择安全边界的同时，直接影响了PCI的空间分布，以及防护所需的PCI分配的最大数目。

2. 基于分散地图的方法

Ahmed等人（2010）的方法也使用了地图着色作为PCI分配的基础，但是他们提出了直接运用在基站上的分散的地图着色算法。邻区关系的识别分为两个阶段，第一阶段是基站识别所有覆盖的小区的PCI。基于此已知信息，选取新的PCI并将小区投入运行。因为覆盖的小区可能低于实际中的邻小区的数量。在第二阶段，基于UE的测量用于识别其他的邻区。作者比较了一系列潜在的可用的分布地图着色算法，通过一些比较来评估这些算法的有效性（如所需PCI重分配与可用PCI数量的对比和所需分配的PCI总数）。

3. 基于分布式RSRP测量的方法

基于UE的测量来发现邻区及邻区相关的配置错误是一种常见的方法，这种方法也使用在（Amirijoo等人，2008）提出的启发式方法中。为了得到邻区关系信息，需估算来自服务UE的RSRP测量报告，此报告包含了切换候选小区的PCI。如果没有列出已知邻区的PCI，服务eNB向UE发出读取E-UTRAN小区全局标识（ECGI）的请求。通过核心网的信息交换来建立新的邻区信息。服务eNB通过发送自己的PCI和ECGI等详细信息告知目标eNB新的邻区信息。

在目标eNbB的NRT已经包含于其他拥有相同PCI的小区混叠的情况下，这种混叠随后会通过重配其中一个小区来解决。

服务小区也可能发生混叠，如当接收到来自UE的RSRP测量报告时，此种情况下包含的PCI已经是NRT的一部分了。服务小区准备切换到该小区时，发生错误是因为实际的目标小区不是NRT中的一个列表。这样的混叠可通过检测切换的成功率

和失败率来检测。如果由一个小区到另一个小区的切换失败，服务 eNB 将向 UE 发出得到目标小区 ECGI 报告的请求，不论它是否收到特定 PCI 的请求。这样就可以检测出多个使用相同 PCI 的邻小区的情况。

对于基于 PCI 分配策略的测量，需要对已经部署的小区进行潜在的高数量重配，直到达到完全无冲突和混叠的状态。如果使用基于地形的方法作为保证，则会给出一个稳定的配置表。常见的缺点是 UE 需得到的测量报告的数目增加，同时增加了能量的消耗且减少了运行时间。

4. 小结

由于未来异构网络的复杂性（参见第 10 章），物理小区标识的自动分配成为一个重要的需求。自动化的物理单元 ID 分配是一个重要的要求。至关重要的是，不光要满足无冲突和混叠的需求，还要满足相关参数限制的满足，如上行和下行的参考信号。为了达到要求的可靠性，需根据已知的问题和属性发掘相关的方法，因为只有这样才能给予必要的保证。提出的多种方法分别针对于 PCI 分配的不同问题，这也导致了不同特点的解决方案。这显示了 SON 的一个优点：移动网络运营商可自由选择满足其自身需求的解决方案，也可与其他方法相结合以形成一个可用的 SON 系统。

4.2.3　自动邻区关系建立（ANR）

对移动网络运营商来说，为切换而建立、更新邻区关系是一种劳动密集型工作，通常称之为邻区关系（Neighbour Relations，NR）。将邻居正确归位非常重要，这主要是因为由切换失败造成的掉话通常起因于邻居丢失。

在 3GPP 各个系统中，切换是由网络控制的，也就是切换的时间和目标小区是由 2G、3G 或 LTE 无线接入网来决定实现的。

切换决定根据 UE 测量来获得，UE 测量受特定系统（如 LTE）给定的参数控制。在 2G、3G 系统乃至 3GPP LTE R10 版本中，UE 都需要维护邻区列表（Neighbor Cell List，NCL），邻区列表指出了 UE 需要侦听的频率/小区。图 4.21 给出了一个例子，图中小区 B 在小区 A 的 NCL 中，而小区 C 不在小区 A 的 NCL 中，这会导致当小区 A 向小区 C 移动时切换失败。除此之外，对于可以使用检测小区报告（Detected Cell Reporting，DCR）的 UE，3G 已经支持同频 DCR，这个功能允许移动终端检测和报告不在邻区列表的同频小区中。

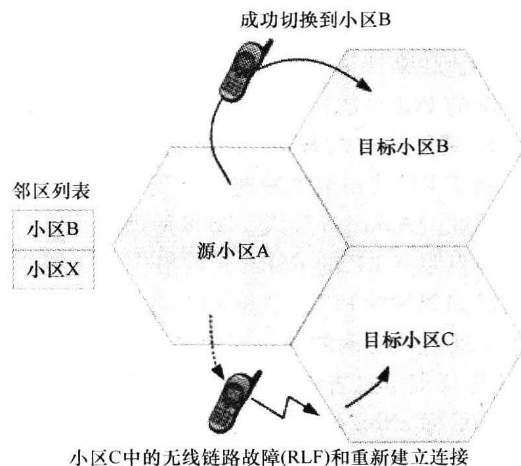


图 4.21　邻区列表中丢失邻居

而在 2G 系统中，移动终端向网络周期性报告相关小区的测量结果，在 3G 和 LTE 系统中，网络命令 UE 仅在符合某些状态时才发送指示，如 LTE 系统中的 A3 事

件（参考5.1.3节的测量事件描述），当有邻居小区比当前服务小区好时，UE才会向eNB发送测量报告。由网络来最终决定UE是否切换到新的目标小区。

在2G和3G系统中，某一指定小区的邻居由小区规划工具利用覆盖预测来选择。预测会带来一些错误，这些错误主要是由地图不完善、新建筑物或天气变化等引起的实际环境改变导致的。为此，运营商需要通过路测来重新查看覆盖、切换区情况。

现在，由于运营商一般拥有大网络，这会是一个繁重且昂贵的工作，而且当其他接入网（如LTE）或其他网络层（如微小区）加入已部署好的2G和3G网络中时，这个工作将会更加复杂。由于状态的改变，除了初始网络部署阶段，在运营阶段也需要邻区（重）定义，随着未来小功率基站（如微基站、微微基站）的大量部署，这种情况的需求量会更大。此时，小区会频繁地出现和消失并且路测会更具有挑战性。因此，自动建立邻区关系将不仅是有用的，而且是亟需的特征。

自动邻区关系允许很大程度的自动邻区配置。网络性能也将受益于优化的、最新的邻区列表，如建立合适的邻区将增加成功切换的次数，最小化由于邻区关系丢失而造成的掉话次数。由于LTE是一项即将部署的新技术/网络，ANR对LTE尤其重要。LTE采用扁平网络结构，没有像无线接入控制器（Radio Network Controller，RNC）这样的中心节点，如果不应用ANR功能，运营商将需要在所有LTE eNB上人工配置大量邻居参数。因此，通过减少人工操作，ANR可以帮助降低运营成本（OPeration EXpenditure，OPEX）。

4.2.3.1 邻区关系预操作

在网络规划阶段，初始邻区关系是基于静态假设的，小区规划工具根据地理位置上的邻近关系和天线方向来计算邻区。

如前面所述，覆盖预测会带来一些错误，如由于地图的不完善和已有的建筑部署数据的不完整造成。为此，运营商需要用路测来补充网络规划阶段，来证实覆盖区数据库和确定所有的切换区域。除此之外，由于一些条件的变化，如新小区、新建筑或者季节性植物等，上述过程需要重复。一种保守的方法是考虑所有邻区关系，甚至包括那些成为实际NR概率很小的小区。这种情况下，邻区列表带有很多无用NR，可能会非常大。由于LTE中NR的语义，无用的NR表项比在3G中问题小，而是从预操作NR到分布式可操作NR转变所必需的一套工具链。进而，运营商可以采用额外的方法，用可以创建或删除邻区的工具，根据定义好的准则（包括小区间距离）来优化邻区列表。例如，3G系统根据每日或每周检测小区报告（DSR）测量结果、基于接收信号码功率（RSCP）的关键性能指标（Key Performance Indicator，KPI）和（或）载干比值来创建系统内邻区。

注意，在任何情况下（用或不用ANR），都需要计算预操作NR（见图4.13）。ANR和传统NR确定方法的区别是，ANR可以省略更详细的NR规划步骤和后续网络单元（Network Element，NE）的NR配置分布。

4.2.3.2 ANR基本原理

受NGMN的建议（参见3.2.2节）启发，SON应用场景“自动邻区配置和X2接口建立”在3GPP R8版本给出了定义。3GPP TS36.300（2010）描述了ANR的步骤

和与环境的关系。

ANR 使 LTE 系统内同频和异频邻居检测以及异系统的邻居检测可行。对于其他方向，3G 或 2G 系统到 LTE 系统都还没有标准化的 ANR 功能。在这种情况下，可以使用厂商给定的解决方案，如在 UE 支持下检测 LTE、3G/2G 的邻居，在优化工具的帮助下建立其他方向的邻居关系。

ANR 功能依靠 UE 来报告检测到的邻区的物理小区标识（PCI），而不依靠任何广播的邻居列表（见图 4.22）。由于 WCDMA 和 LTE 中的频率重用，这种功能是可行的。UE 报告的 PCI 必须在执行切换之前映射到 E－UTRAN 小区全局标识（Cell Global Identifier，CGI）。PCI－ECGI 映射可以通过两种方式来完成：

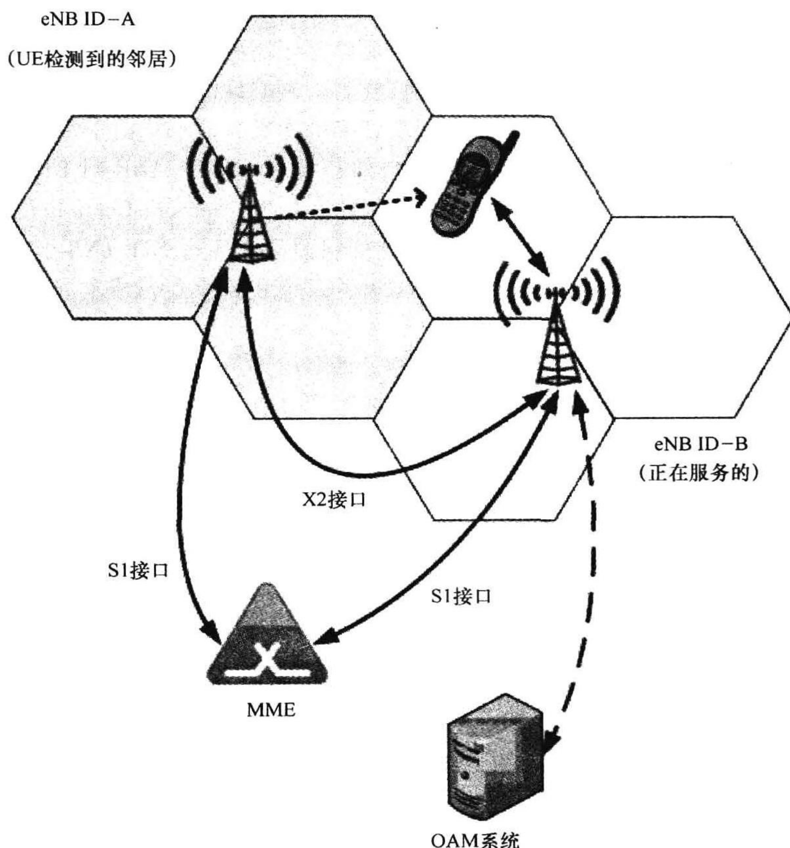


图 4.22　ANR 基本原理

1）对基于 UE 的 ANR，UE 从广播信道解码目标小区的 ECGI（参见 4.2.3.3 节）完成映射。对 ECGI 的解码能力是 UE 的可选特征。当 UE 执行了 ECGI 解码后，将信息存储在 eNB 中，其他 UE 不必再进行解码。

2）OAM 支持下 UE 触发的 ANR（参见 4.2.3.4 节）不需要对 UE 的 BCCH 系统信息进行额外且昂贵的译码，而是通过使用操作、管理和维护（Operation，Administration and Maintenance，OAM）系统的能力和信息（位置），依靠网络来完成（见图 4.22）。

最后，需要将EGCI解析成邻居eNB的IP地址，这个工作由核心网（MME）来完成（参见8.2.2节），需要根据情况或通过OAM系统进行预先配置。因此，ANR可以看作一种拥有分布式和集中式组件的混合SON功能（参见3.4节）。

4.2.3.3　基于UE的ANR

根据3GPP，UE测量并报告如下小区类型：

1）服务小区；

2）eNB指示的邻区；

3）检测到的小区，也就是E-UTRAN没有指示但是UE检测到的小区。E-UTRAN指示载波频率。

检测到的小区可以是使用与服务小区相同频率的LTE小区、使用不同频率的LTE小区，或者可能是属于其他系统的小区。在后两者情况下，UE需要指示才能执行不同频率下的测量。

自动邻区关系功能包括3步：

1）发现邻区。

2）发现邻居站点的X2接口传输配置和X2接口连接建立（LTE内），在HeNB场景或小功率基站（微基站，微微基站）场景下，可能是通过MME的逻辑X2接口连接。

3）邻区配置更新。

邻区关系优化（Neighbour Relationship Optimisation，NRO）是一个相对独立但又与邻区关系相关的功能。

1. LTE系统内部/同频ANR

第1步，邻区发现过程，如图4.23所描述。

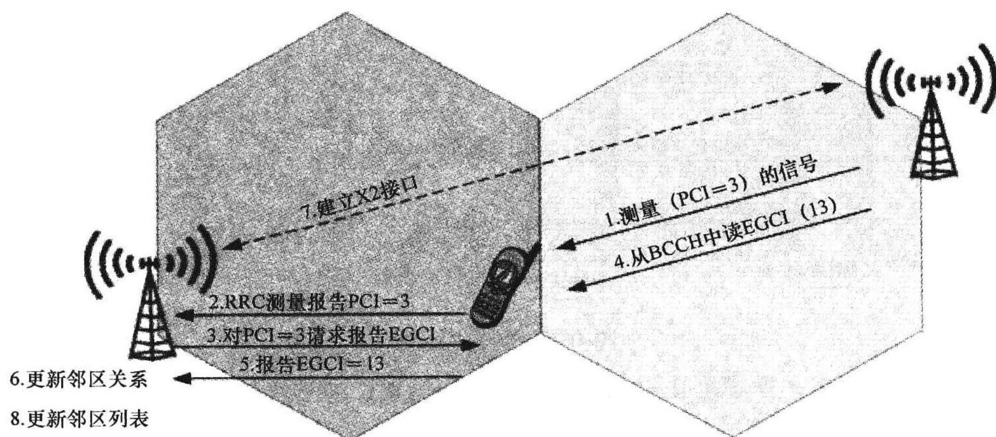


图4.23　LTE中的ANR（Holma和Toskala，2011，在John Wiley&Sons，Ltd允许下转载）

1）当UE从空闲状态转变到RRC_ CONNECTED状态时，根据测量配置指示，UE报告检测到的信号最强的小区，甚至可以是当前未知的PCI（如果PCI在无线资源控制黑名单中，则不会发送请求）。

2）UE 测量它检测到的小区的 PCI（检测到但不在预定义的邻居列表中的）并报告给 eNB。

3）如果 eNB 接收到 UE 的指示未知 PCI 的报告，它会命令 UE 从检测到的小区的广播信道中读取 ECGI。

网络运营商可以在 NM 级上为 ANR 配置“黑名单”小区（3GPP TR 32.511，2011）；黑名单上的小区在系统信息块（System Information Block，SIB）4 和 5 上广播，参照 3GPP TS 36.331（2010）。黑名单上的小区将不会受 ANR 配置，即使 UE 报告表明是信号最强的邻居。运营商可能希望阻止一些切换候选小区，如在高建筑物中从室内小区切换到室外小区，或未经漫游许可（“no HO”属性）接近其他网络。也可能仅在建立实际 X2 接口时用黑名单，如为了避免 HeNB 和宏基站之间建立太多 X2 连接。当 NR 明确地在 NM 级上建立（并且只能在这里去除）时也可能用“白名单”。

第 2 步和第 3 步定义传输层设置，在图 4.24 中详细描述。

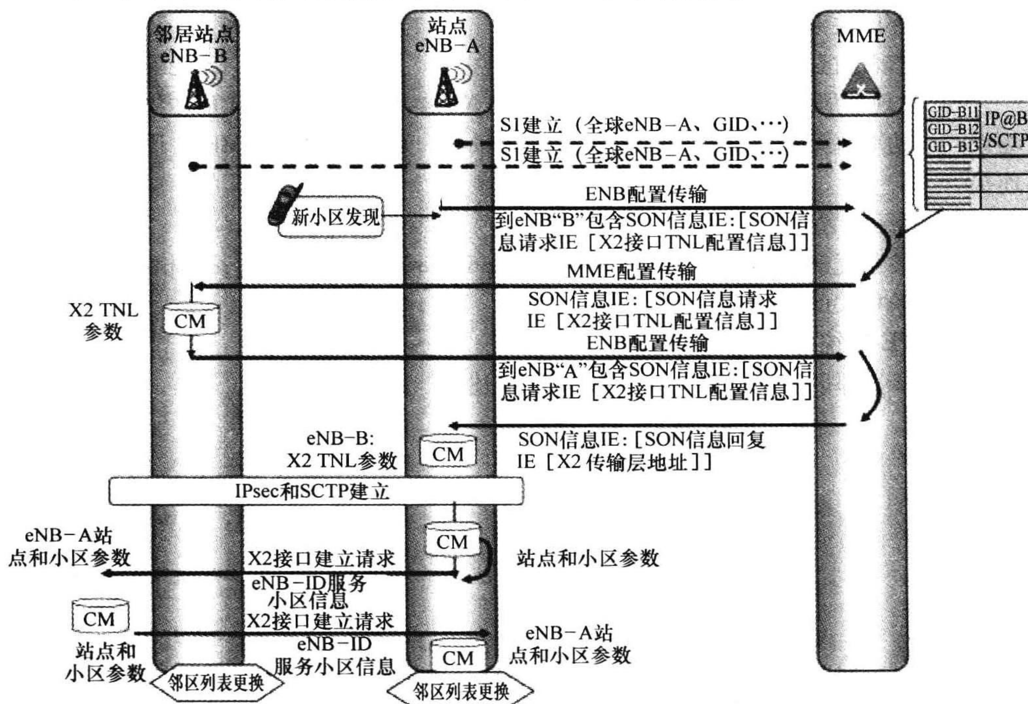


图 4.24 传输层设置

ECGI 不能用于直接在 IP 传输层地址化邻居站点。因此需要将 ECGI 解析到传输网络控制层配置，为了在这之上与 SCTP 建立 IP/IPsec 关联。

根据 3GPP 工作组 RAN3 的定义，使用配置传输过程（3GPP TS 36.413，2011）来实现两个邻居站点之间交换 SCTP 配置 IP 地址（参见 8.2.2 节）的工作。eNB 向 MME 请求与 ECGI 相关的 IP 地址，更新自己的邻居列表，与对等 eNB 建立 X2 连接并通过 X2 接口互换配置数据。对 LTE 内基于 UE 的 ANR 的评估可以参考（Dahlén 等

人，2011）。

NRO（NR Optimisation，NR 优化）是一种厂商特定的 SON 功能。邻居去除功能可以去除过期邻区关系。例如，可能会给每个加入的邻区关系添加一个时间标记；如果在给定时间段内小区没有报告，相关的邻区关系就会被删除。

2. 异系统 ANR

除了 LTE 同频场景，3GPP 明确定义了 LTE 异频和异系统 ANR 功能。在这种场景中，eNB 可以指示 UE 对其他频段和系统进行测量并检测小区。对于异频、异系统 ANR，每个小区包含一个异频搜索列表，这个列表中包含了所有将要搜索的频带。

ANR 机制与同频 ANR 类似，但是现在 eNB 指示 UE 对其他系统/频带上的小区进行测量。

1）在连接模式，指示 UE 对其他系统/频带进行测量并上报邻居。为执行这个工作，eNB 可能需要调度合适的空闲时隙来允许 UE 对目标系统/频带内的所有小区进行扫描。

2）UE 测量其已检测到的目标系统/频带内的小区的 PCI，并将其报告给当前的服务 eNB。在 UTRAN FDD 小区场景中，PCI 由载波频率和主扰码（Primary Scrambling Code，PSC）定义，在 UTRAN TDD 小区场景中，由载波频率和小区参数标识（Cell Parameter ID）来定义，在 GERAN 小区中，由带宽指示（Band Indicator）、基站标识码（Base Station Identity Code，BSIC）以及 BCCH 绝对无线频道编号（Absolute Radio Frequency Channel Number，ARFCN）来定义，而在 CDMA2000 小区中，由 PN 码偏置指数（PseudoNoise Offset）定义。

3）如果 UE 上报一个未知 PCI，对于 GERAN 检测小区的场景，eNB 指示 UE 读取邻居小区 CGI 和路由区标识（Routing Area Code，RAC），对于 UTRAN 检测小区的场景，读取 CGI + 位置区码（Location Area Code，LAC） + RAC，对于 CDMA2000 检测小区的场景，读取 CGI。对于异频场景，eNB 指示 UE 读取 ECGI、跟踪区码（Tracking Area Code，TAC）和所有频带内检测到的小区的 PLMN ID。这种场景比同频场景更难，因为 eNB 可能需要调度合适的空闲时隙来允许 UE 同步到指定的频带/系统上，并且从检测到的小区的广播信道上读取请求信息。

4）UE 将检测到的 CGI 和 RAC（在 GERAN 检测小区的场景下）或 CGI、LAC 和 RAC（在 UTRAN 检测小区的场景下）或者 CGI（在 CDMA2000 检测小区的场景下）上报到服务小区的 eNB。对于异频场景，UE 上报 EC 检测到的小区的 ECGI、TAC 和所有已发现的 PLMN - ID。在图 4.25 中，UTRAN 检测小区场景的自动邻区关系原理如图 4.25 所示。

5）eNB 更新异系统/异频邻居关系列表（NRT）。

4.2.3.4 OAM 支持下 UE 触发的 ANR

对未知小区 eNB 应用自动检测和 NR 配置的另一个方法是在 OAM 系统的帮助下。因为 UE 的特定 ANR 测量支持是可选项，这种模式影响不支持 ECGI 解析的 UE。这与初始 LTE 部署尤其相关，此时没有或仅有少量支持特定 ANR 测量的 UE 可以用。因此，OAM 支持下 UE 触发的 ANR 可以看作基于 UE 的 ANR 的补充功能，也是一种

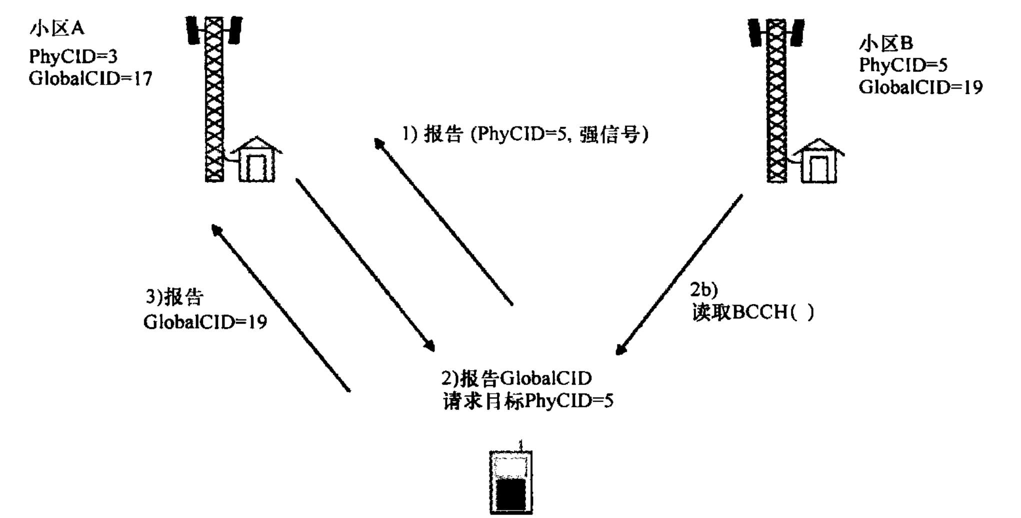


图 4.25　UTRAN 检测小区场景下（3GPP TS36.300，2011.3）的自动邻区关联功能（3GPP 允许转载）

带有分布式和集中式组件的混合 SON 功能（参见 3.4 节）。OAM 支持下 UE 触发的 ANR 还没有标准化（也就是集中式的组件位于 DM 级），但是标准化解决方案（在 NM 级）在技术上是可行的。

本特征包括准备阶段，此时 OAM 系统创建（和维持）一个带有相关 IP 连接信息的潜在邻区列表（PCI－ECGI－IP 地址）。

OAM 支持下 UE 触发的 ANR 包括以下步骤（见图 4.26）：

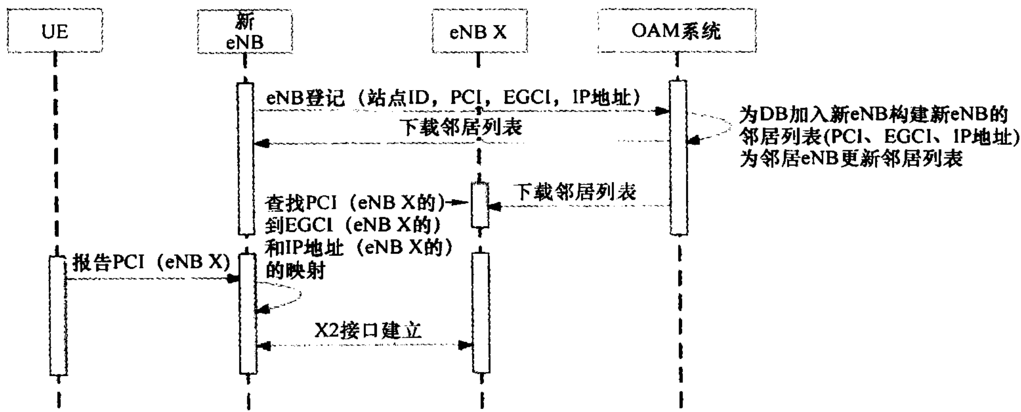


图 4.26　OAM 支持下 UE 触发的 ANR

1）当 eNB 注册到 OAM 系统时，触发建立一张包括新 eNB 当前邻居 PCI/ECGI/IP 地址数据的表格。这张表下载到新 eNB，新 eNB 的邻居 eNB 表格也可以通过 OAM 系统来更新。注意，若假定相关邻区中 PCI 是惟一的（参见 4.2.2 节），则一个 PCI 可以直接映射到一个 IP 地址。因此，当基于新 eNB 的注册来创建表格时，可以检测到

实际 PCI 冲突/混淆问题。

2）邻区发现（无线部分）：与基于 UE 的 ANR 类似，UE 测量新小区的信号并上报测量结果。然后，因为邻居信息在上一步中已经获得了，不会指示 UE 从检测到的小区邻居系统信息中读取 ECGI。

3）X2 传输配置"发现"：拥有新发现小区的邻居 eNB 的 IP 地址也可以从映射表中获得（而不是通过 S1 接口基于 MME 进行地址解析）。

4）然后建立 X2 连接，eNB 与新邻居互换服务小区的信息，如 3GPPTS 36.423（2011）所定义。这一步对基于 UE 的 ANR 来说是一样的。

表 4.3 对比了基于 UE 的 ANR 和基于 OAM 的 ANR，包括所需功能和在 UE、eNB 和 DM 级上的标准化状态。

表 4.3　基于 UE 的 ANR 与 OAM 支持下 UE 触发的 ANR 对比

	ANR 类型	基于 UE	OAM 支持下 UE 触发
需要的功能	标准化的 PCI 报告	X（分布式）	X（分布式）
UE	标准化的 EGCI 报告	X（分布式）	
eNB	标准化的 X2 连接建立	X	X
	标准化的通过 S1 接口进行 IP 地址解析	X（集中式）	
域管理器（Domain Manager，DM）	通过南向接口进行私有地址解析		X（集中式）

4.2.3.5　3G 自动邻区关系建立

正如引言中提到的，自动邻区关系建立是 3GPP 主要为 LTE 定义的一个 SON 特性。这主要是因为已有网络部署的运营商想要大幅降低在引入新的 LTE 层时，由于邻区自适应而引起的网络规划和设置改变（configuration changes）。这些运营商通常对将 ANR 扩展到成熟技术（如 WCDMA 和 GSM）中，并不感兴趣，因为在这些技术中，相邻节点已经被配置并稳定了多年。

尽管如此，新运营商或那些由于容量需求和（或）由于不具有 LTE 牌照而打算扩展 3G 网络的运营商都表达了他们将 ANR 扩展到 WCDMA 的需求。这是 3GPP 开始讨论将该功能扩展至 WCDMA 中的原因：一个接入 3G 小区的用户将可以报告相邻的 UTRAN、LTE 和 GSM EDGE 无线接入网络（GSM EDGE Radio Access Network，GERAN）小区，即使这些小区没有在邻区列表中广播。UTRAN 中的 ANR 已经在 3GPP TS 25.484（2011）中标准化。

正如 4.2.3.3 节中的描述，LTE 的 ANR 功能是位于 eNB 的两步算法（two - step approach），该功能基于 UE 的监测小区报告，并在此之后指示 UE 得到某个特定监测小区的系统信息（System Information，SI）。这一机制促使 UE 进入激活模式；同频邻区可以简单地通过 UE 的自动间隔（DRX）来监测，而异频和不同 RAT 之间则需要通过 UE 暂停收发、切换到其他频率（由网络指示）来实现小区测量。

UTRAN 的 ANR 基于空闲模式而不是激活模式。事实上，与 LTE 方法类似，

CELL _ DCH/SI 获取最初在 3GPP 中提出。在这种情况下，网络需要配置压缩模式或其他方法来容忍测量和目标小区 SI 获取的间隔（“空闲周期”）。但是这种解决方案对于单 - RX UE 来说成本过高，还会引入显著故障。

3GPP 提出的另一种替代方案是监测小区重选。UE 选择一个已监测到的小区，获取 SI 并为后续 ANR 报告存储相关的邻区信息。当 UE 重选已监测到的小区时，邻区 SI 获取变成“免费”的。UE 在合适的时间即当 UE 上有 UL 传输时，汇报给网络。尽管这种方案由于简便性而具有吸引力，但仍不能满足使用的需求（在同频覆盖场景下性能不佳）。

因此，3GPP 决定探索第三种解决方案，称为 UE 记录模式（UE Logging Mode）。由于 UMTS ANR 需求，在这一模式重用了当前已标准化的记录最小化路测（Minimisation of Drive Test，MDT，见第 7 章）方法。UE 在挂起状态、CELL _ PCH 和 URA _ PCH 状态下运行 ANR。

图 4.27（左图）描述了这一过程：UE 设置 ANR 测量和参数。当 UE 在挂起状态时，CELL _ PCH 或 URA _ PCH 已经监测到一个新小区（即一个不在 NCL 中的小区），UE 在一个“日志”中存储服务小区和监测到的小区的 ID 以及相关的 SI。如果 UE 可以监测到与服务小区异频的小区，那么只在 NCL 列出的小区频率中（最多两个）进行上述操作。当建立一个 UL 连接时，UE 向当前的服务小区指示日志的可用性，这一操作将会在 UE 中检索日志。在 UE 指示一个记录 ANR 报告的可用性后，接收 RNC 通过 Uu 接口使用 RRC 信令取回 ANR 报告。接收 RNC 处理这些报告并可能发送给不同的 RNC。

不同 RAT 场景下的工作非常类似（见图 4.27 右图）。当正被 UTRAN 小区服务时，UE 不会监测相邻的 GSM 或 LTE 小区。但是只有在 UE 反馈 UTRAN 小区，且 UTRAN SI 块中没有告知之前在 LTE 或 GSM 使用的小区时，UE 才会上报日志。当 UE 在选择 UTRAN 小区和 RNC 可能从 OAM 取回额外的小区属性时，UE 向网络告知日志的可用性。

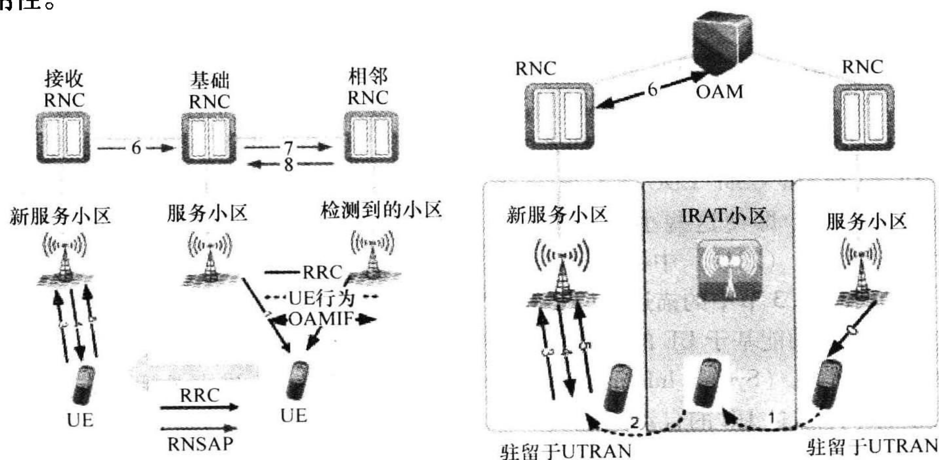


图 4.27　3GPP R10 版本中的 3G ANR（3G 内：左图，RAT 间：右图）

注意，3GPP R10 版本中的 ANR 不包括闭合用户组（Closed Subscriber Group，CSG，见第 10 章）。

4.2.3.6 中继部署中的 ANR

中继节点（Relay Node，RN）的部署是第 2 章中描述的 LTE－Advanced 场景之一；4.1.3 节描述了中继部署中的自动连接。

中继节点基本沿用了之前描述过的基于 UE 的 ANR 策略，但为了应对以主基站和 RN 本身为特色的中继架构细节，该策略会有微小的调整。

下面将给出一个潜在的 RN 部署为例说明 ANR：图 4.28 描述了区域中在有/无 RN 部署时（主）基站之间的邻居关系。图 4.28 中的左图表明 eNB_1 只有 eNB_2 和 eNB_4 为邻居的情况。由于 eNB_1 与 eNB_3 之间的覆盖漏洞，使得 UE 不能测量相关邻区，且 eNB_1 与 eNB_3 之间没有 X2 接口。

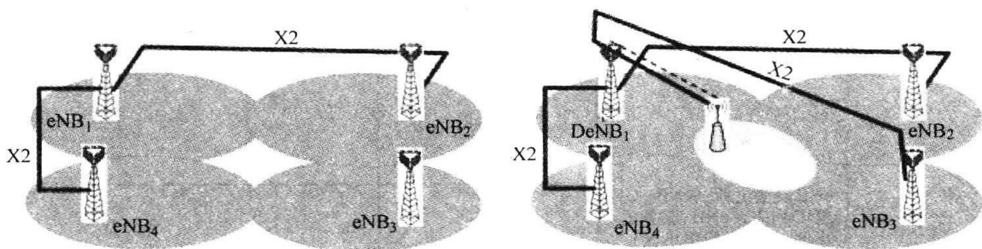


图 4.28 无（a）和有（b）中继部署时 $DeNB_1$ 的邻居关系

为解决这一覆盖漏洞，运营商可能会希望更新 eNB_1 的中继功能，也就是 eNB_1 将作为主 eNB。主 eNB_1 和 eNB_3 现在可以通过 RN 小区建立邻居关系，并且 eNB_1 与 eNB_3 之间需要建立 X2 接口（见图 4.28 中的右图）。

当 RN 通过 UE 的测量发现 eNB_3 小区时，ANR 过程开始。RN 要求新监测到的小区 X2 传输网络层（Transport Network Layer，TNL）通过 eNB 配置转移（Configuration Transfer，见 8.2.2 节）向 $DeNB_1$ 寻址。若 $DeNB_1$ 和新监测到的小区之间没有可用的 X2 接口，建立 X2 接口的执行过程如图 4.29 所示。eNB 不需要与新监测到的小区建立直接的 X2 接口，因为邻居关系可以通过 DeNB 可见：由 $DeNB_1$ 发出的 MME 配置转移消息可以包括甚至省略传输层寻址中的任意赋值。如图 4.29 中包括了 $DeNB_1$ 的 X2 TNL 寻址。

X2 TNL 建立之后将执行 eNB_3 和 $DeNB_1$ 之间的 X2 设置过程。$DeNB_1$ 创建 eNB 配置更新消息，该消息由 eNB_3 生成，并发送给 RN（见图 4.29）。当 RN 接收到该 eNB 配置更新消息时，它将知道该消息指代新监测到的相邻 eNB，即使该消息中的 TNL 寻址是 $DeNB_1$。eNB 配置更新消息包括相邻 eNB 支持的全局惟一（Globally Unique）组 ID 列表，这将允许 RN 确定 X2 切换是否可以应用，即需要切换到相邻 eNB 的 UE 是否由该相邻 eNB 支持的一个 MME 池所服务。

如果 $DeNB_1$ 与 eNB_3 之间存在已建立的 X2 接口，X2 接口会直接向 RN 发送相邻 eNB 小区相关的最新信息，并从邻居 eNB 接收最新的 eNB 配置更新消息，即例图

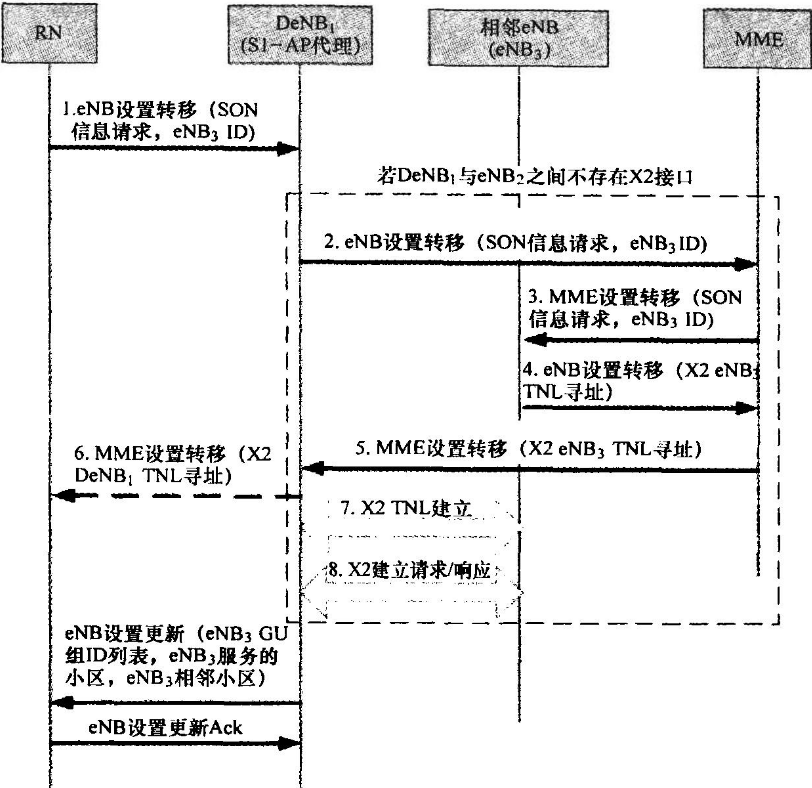


图 4.29　RN 与 RN 初始化的相邻 eNB 之间的 X2 建立

4.28 左图中 eNB_2 与 eNB_4 之间的情况，其中 $DeNB_1$ 与它们之间已有建立的 X2 接口。

如果 eNB_1 的其中一个邻区更新其配置（如 MME 服务和/或支持的小区），该邻区向 eNB_1 发送 eNB 配置更新消息，这一过程可以认为是 DeNB 反过来更新 RN。

RN 与相邻 eNB 之间 X2 接口的可用性取决于 DeNB 与其相邻 eNB 之间 X2 接口的可用性，同时 RN 与相邻 eNB 之间 X2 切换的可用性由 RN 的 OAM 系统设置（类似于两个 eNB 之间的 X2 切换情况）。

4.2.4　DRC 结构

在 OAM 架构中（参见 2.1.9 节），DRC（动态无线配置）SON 功能的部署有多种方案（参见 3.4 节）。

4.2.4.1　网管中心

在这种备选的部署方案中，DRC 功能的执行和协调位于网管层面，也就是说，相应的算法在一个中心实体执行。在该种部署方案中，网管层面以下的已有接口和配置管理功能都可以重用，因此其主要优势在于对已有接口和标准化的影响非常有限，而且可以配置在那些已经安装好的基站（eNB）上，且无需对这些基站进行改造。这种部署方案的主要技术挑战是在执行自配置过程中来自于不同新输入源的数据的集

成。另外，由于提取层面太高，使得计算与特定设备商的算法密切相关的参数变得非常困难。

4.2.4.2　域管中心

在这种部署方案中，为了使得不同域中的参数能够一致，网管（NM）层面将扮演一个中继或代理的功能。当重配置需要被触发时，网管层面需要扮演中继功能；而当需要进行数据交换时，网管层面需要扮演代理功能。NM层面的中继点带来了额外的复杂度，如在协调和异常处理方面。

4.2.4.3　网元中心

在该种部署方案下，动态无线配置功能的执行位于基站（eNB）处（参见3.4节中的“分布式SON”）。在这种部署方案中，网管层面完成其在上面介绍的“域管中心”解决方案中相似的功能，另外南向接口需要为分布式算法提供支持监测、控制和输入数据的功能。对于基础配置参数如物理小区号（PCI），eNB需要能自动发现其所有的邻居基站（参见4.2.2节）。分布式功能也需要X2接口具备大数据量交换和协调的功能。在这种配置方案中，也必须确保不同eNB输入参数一直同步，并与相应的集中式管理功能一致。所有已有的eNB都需要升级为支持这些必备功能，然而这在一个拥有多个设备商产品的网络中是不太容易实现的。

4.2.4.4　混合解决方案

在混合解决方案中，动态无线配置功能被拆分成几个部分，其中一部分部署在一个层面，而其他部分部署在其他层面。这种拆分部署可以是在OAM参考架构中的NM层面与DM层面、NM层面与NE层面（其中DM作为一个中间实体）、NE层面与DM层面，或者甚至可以是在所有的三个层面。混合解决方案的主要缺点在于不同层面之间需要精准的协调和同步（参见第9章）。

4.2.4.5　最优架构

理论上，每个参数配置的最优架构都不一样。表4.4列举了各个参数在OAM架构中推荐的处理位置。为了简化协调功能，如果输入的参数和需要重配置的小区对应的地理范围越大，则DRC SON功能和协调功能位于的管理层面就应该越高。另外，框架也应该将特定设备商的算法需要的参数考虑在内。

表4.4　DRC功能最优部署位置

层级	NE	DM	NM
配置参数	NR	(NR) (PCI) (PRACH RS index) (RS CS)	天线倾角 发射功率 TA PCI PRACH RS index RS CS

因此，大多数参数的算法应该部署在网管层面。括号中的参数指示次优或稍差的部署位置。

通常，可以发现DRC功能的如下4个特征：

1）输入参数：需要考虑多个小区范围，甚至是多个厂商范围；需要收集来自不同数据源的数据并进行集成。

2）协调：一连串有序的功能；在多个 NE 之间；重配置已经操作过的小区和对新小区进行初始配置。

3）有限的可扩展性要求：算法在网元处或蜂窝插入时执行，仅有很少的节点需要重新执行。

4）由于算法执行主要在预操作（即建立）阶段完成，因此 DRC 的响应时间没有特别严格的要求。

在自配置管理集成参考点（参见 4.1.2 节）领域，3GPP 已经标准化了“自动无线配置功能”，见 ARCF（3GPP TS32.502，2010）。这一标准中涉及的与“网管”相关的参数（见表 4.4 中列举）实际上是在网管层面计算，然后再通过北向接口分发给不同的域管。对于基于用户设备的自动邻居关系建立需要注意的是：正如 4.2.3 节中指出来的，其关键组成部分在基站，然而在核心网（IP 地址解析）和 OAM 系统（黑/白链表）中也有其补充部分。

简言之，整体解决方案是混合的，但是无线参数在网管层面的处理也是值得重点强调的。

4.2.5　小结

基站的动态无线配置允许在蜂窝网络中以最小的规划开销为代价实现蜂窝网络的自配置。基站的动态无线配置的这些功能主要由一系列自动计算无线参数的算法和支持必须输入参数收集、配置新小区和重配置邻居小区的协调功能组成。所有这些功能按照通过考虑运营商策略而制定的预定顺序进行激活。算法可以从那些传统的网络规划和配置工具链派生而来，但是必须适应动态的执行方式。

在动态无线配置过程中，运营商在其中扮演的角色不同于其在传统的基站配置中扮演的角色。在传统的基站配置中，常常有一个（远程的）专员为各接入点提供无线配置规划。而在自配置过程中，远程专员的主要任务是监测基站的启动过程和运行状态中动态配置算法的性能。动态配置算法的监测主要是基于事件通知和关键性能指标（KPI）收集来实现的。

运营商应该也可以通过策略来控制动态无线配置（DRC）。其具体包括自配置算法的选择、算法参数的精细调整、定义参数值约束、管理重配置进程和故障处理等。只有在特殊情况下，才使用运营商人工告警，并且接管控制，使得动态无线配置中的输入数据和策略正确。

这个框架允许所有静态基础架构网络向完全动态基础架构网络过渡。在静态基础架构网络中，参数在网络部署前均已规划好；而在完全动态基础架构网络中，只有网元位置在网络部署前规划好。虽然动态无线配置的内容概述中包括“瞬间”重配置，然而在实际的系统中其实现存在一些限制：根据如上算法触发的重配置可能需要被推迟到低负载时段，如在重配置发生区域可能会产生位置更新风暴和临时寻呼失败。无线配置的修改可能也会引起硬件模块的重启，结果产生临时的业务中断。原则上，新

小区直到其临近小区均适应了其插入带来的影响后才能开始运行（然而，这可能会受到运营商策略的影响）。因此，需要一个协同功能去控制已有小区的重配置和新小区的运行状态（参见第9章中的 SON 运行部分内容）。对于本书关注的 E－UTRAN，相应的解决方案并不是完全动态的，但是提出的框架可以使解决方案朝这个方向逐步迈进。3G 中相应的解决方案在动态性方面与 E－UTRAN 中的情况相同，即在同一个级别上。对于给定的特定无线接入技术，所提出的无线概念均以相似的方式应用（在 WCDMA 中用扰码替代物理小区号，参见4.2.2节，邻居小区列表替代邻居关系列表配置，参见4.2.3.5节）。

参考文献

3GPP TR36.902 (2011) Technical Specification, Technical Specification Group Radio Access Network, Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Self-Configuring and Self-Optimizing Network (SON) Use Cases and Solutions, ver.9.3.1., Release 9, 7 April 2011. Available from http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.902/36902-931.zip [accessed 30 June 2011].

3GPP R3-102370 (n.d.) *Nokia Siemens Networks, Solution for RN configuration*, TSG-RAN3 contribution, http://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/WG3_Iu/TSGR3_69/Docs/R3-102370.zip. [accessed 19 August 2010].

3GPP S5-091879 (n.d.) *Nokia Siemens Networks, Starting Material for Automatic Radio Network Configuration Data Preparation*, TSG-SA5 contribution. http://www.3gpp.org/ftp/tsg_sa/WG5_TM/TSGS5_64/Docs/S5-091879.zip [accessed 20 March 2009].

3GPP TS36.331 (January 2010) *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC); Protocol specification*, 3rd Generation Partnership Project (3GPP).

3GPP TS23.401 (March 2010) *General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) access*, 3rd Generation Partnership Project (3GPP).

3GPP TS32.501 (March 2010) *Self-configuration of network elements; Concepts and Requirements*, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), (Release 9).

3GPP TR36.806 (March 2010) *Relay architectures for E-UTRA (LTE-Advanced)*, 3rd Generation Partnership Project (3GPP).

3GPP TS32.502 (June 2010) *Self-Configuration of Network Elements Integration Reference Point (IRP); Information Service (IS)*, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), (Release 9).

3GPP TS32.532 (June 2010) *Software Management Integration Reference Point (IRP); Information Service (IS)*, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), (Release 9).

3GPP TS33.310 (December 2010) *Network Domain Security (NDS); Authentication Framework (AF)*, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), (Release 10).

3GPP TS36.300 (March 2011) *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN), Overall Description, Stage 2*, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), (Release 10).

3GPP TS36.423 (March 2011) *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); X2 application protocol (X2AP)*, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), (Release 10).

3GPP TS36.413 (March 2011) *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); S1 Application Protocol (S1AP)*, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), (Release 10).

3GPP TS25.484 (June 2011) *Automatic Neighbour Relation (ANR) for UTRAN, Stage 2*, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), (Release 10).

3GPP TR32.511 (June 2011) *Automatic Neighbour Relation (ANR) management; Concepts and requirements*, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), (Release 11).

3GPP TS36.211 (June 2011) *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Channels and Modulation*, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), (Release 10).

Ahmed, F., Tirkkonen, O., Peltomäki, M. *et al.* (2010) Distributed graph coloring for self-organization in LTE networks.

Journal of Electrical and Computer Engineering, **2010**. http://www.hindawi.com/journals/jece/2010/402831/ [accessed 20 March 2010].

Amirijoo, M., Frenger, P., Gunnarsson, F. *et al.* (2008) Neighbor cell relation list and physical cell identity self-organization in LTE. IEEE International Conference on Communications Workshops, Beijing, China, 37–41.

Bandh, T., Carle, G. and Sanneck, H. (2009) Graph coloring based physical-cell-ID assignment for LTE networks. 5th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, Leipzig, Germany, June.

Bandh, T., Romeikat, R., Sanneck, H. *et al.* (2010) Optimized network configuration parameter assignment based on graph coloring. IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium, Osaka, Japan, April.

Bandh, T. and Sanneck, H. (2011) Automatic Site Identification and Hardware-to-Site-Mapping for Base Station Self-configuration, IEEE International Workshop on Self-Organizing Networks, Budapest, Hungary, May.

Dahlén, A., Johansson, A., Gunnarsson, F. *et al.* (2011) Evaluations of LTE Automatic Neighbor Relations, IEEE International Workshop on Self-Organizing Networks, Budapest, Hungary, May.

Eisenblätter, A., Türke, U., and Schmelz, C. (2011) Self-Configuration in LTE Radio Networks: Automatic generation of eNodeB parameters, IEEE International Workshop on Self-Organizing Networks, Budapest, Hungary, May.

Holma, H. and Toskala, A. (eds) (2010) *LTE for UMTS: Evolution to LTE-Advanced, Revised Edition*, Chapter on SON, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK.

Horn, G., Forsberg, D., Moeller, W.D. and Niemi, V. (2010) Certificate Enrolment for Base Stations, Chapter 8.5, in *LTE Security*, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK.

IETF RFC 2131, Droms, R. (1997) *Dynamic Host Configuration Protocol*, IETF, March.

Lang, E., Redana, S. and Raaf, B. (2009) Business impact of relay deployment for coverage extension in 3GPP LTE-advanced. IEEE International Conference on Communications, June.

Lee, P., Jeong, J., Saxena, N. and Shin, J. (2009) Dynamic reservation scheme of physical cell identity for 3GPP LTE femtocell systems. *Journal of Information Processing Systems*, **5**(4), S.207–S.219, http://jips-k.org/dlibrary/JIPS_v05_no4_paper5.pdf.

Sanneck, H., Bouwen, Y. and Troch, E. (2010a) Context based configuration management of Plug & Play LTE base stations. IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium, Osaka, Japan, April.

Sanneck, H., Bouwen, Y. and Troch, E. (2010b) Dynamic radio configuration of self-organizing base stations. 7th International Symposium on Wireless Communication Systems, York, UK, September.

Sanneck, H., Schmelz, C., Baumgarth, T. and Keutner, K. (2007) Network element autoconfiguration in a managed network. IFIP/IEEE Symposium on Integrated Management, Munich, Germany, May.

Sanneck, H., Schmelz, C., Troch, E. and De Bie, L. (2009) Auto-connectivity and security setup for access network elements. IFIP/IEEE Symposium on Integrated Management, New York, NY, June.

Szilágyi, P. and Sanneck, H. (2011) LTE relay self-configuration. IFIP/IEEE Symposium on Integrated Management, Dublin, Ireland, May.

Welsh, D.J.A. (1967) An upper bound for the chromatic number of a graph and its application to timetabling problems. *The Computer Journal*, **10**(1), S.85–S.86.

Wu, Y., Jiang, H., Wu, Y. and Zhang, D. (2010) Physical cell identity self-organization for home eNodeB deployment in LTE. 6th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM), Chengdu City, China, pp. 1–6, http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5600778.

第5章 自 优 化

Daniela Laselva、Ingo Viering、Dirk Rose、Jeroen Wigard、Seppo Hämäläinen、Krysztof Kordybach、Osman Yilmaz、Jaroslaw Lachowski、Paul Stephens、Andreas Lobinger、Bernhard Wegmann、Henrik Martikainen 和 Cinzia Sartori

在网络运营过程中，对网络进行如前面所述的合理配置后，还有必要进一步对网络进行优化。一方面是因为环境可能会变化，例如：

1）传播条件，如新的建筑、街道，秋天落叶。

2）业务行为，如新的业务集中点。

3）网络部署，如新基站的添置。

因此，之前的配置参数可能变得不是最优的。为了跟踪上述变化，参数的自适应功能可以明显改善网络的性能。

需要进一步优化的另一方面原因是，对具有实际负载条件的运营网络进行测量的结果，比初始配置的假设数据更贴近实际情况。在很多时候，测量结果能发现很多问题，这是基于对传播环境和业务进行初始假设所预测不出来的。所以，即使环境不存在上述变化，已配置的参数也应该在网络运营过程中进行检测和更新。

“自优化”这个概念，概括了运营过程中对参数进行优化的机制，尤其是基于网络测量的参数优化。它跟“自配置”并不总是有明显的区别，就拿动态无线配置功能（参见4.2节）来说，如自动邻居关系（Automatic Neighbour Relation，ANR），将在初始自配置阶段执行，然后作为自优化的一项功能在运营阶段进一步执行（如果需要的话）。在本书中，下述特性被归类为“自优化”，并将详细讨论：

1）移动鲁棒性优化为用户确保了合适的移动性，即正确的切换和小区的重选，这些小区可能使用相同的RAT，也可能使用不同的RAT。

2）移动性负载平衡和业务调整试图在小区间对业务进行最优地分配，这主要是负载条件方面的原因，同时还有速率、QoS和能耗等其他特性的原因。很明显，它跟上面阐述的移动鲁棒性优化有很多的交互。

3）节能得到了比以前更多的关注。节能在网络端和UE端都需要进行，如关闭未使用的网络节点，或者降低传输功率。

4）覆盖和容量优化使天线角度和传输功率持续地适应最大覆盖，其还可以通过最小化小区间干扰来优化容量。

5）RACH优化在随机接入性能和为了达到一定性能而消耗的资源之间找到最好的折中点。

6）最后，无线资源管理参数需要自适应地进行配置。这其中有很多参数只需基于eNB内部的本地信息就能优化，如控制信道的配置，因此本书不予讨论。还有一

些参数具有很明显的 SON 特性，本书将进行详细阐述，包括功率控制参数的优化和小区间的干扰协调。

5.1　MRO

移动鲁棒性优化（Mobility Robustness Optimisation，MRO）的主要任务是保证合适的移动性，即连接模式下正确的切换和空闲模式下正确的小区重选。下面将要提到的小区改变一词，指代切换或小区重选。本书的阐述既会讨论 LTE 网络内部的移动性（如同频和频率间的移动性），又会涉及 LTE 小区到其他 RAT 之间的移动性（如不同 RAT 间的移动性）。为了简便，其他 RAT 到 LTE 之间的 RAT 间移动性以及 2G/3G 网络内部移动性将不予讨论。

5.1.1　MRO 的目标

首先详细探讨 MRO 目标，下面是按重要性的顺序排列的：

1）最小化掉话率：在最坏的情况下，移动性问题会导致掉话。掉话直接给用户带来不好的体验。

2）最小化无线链路错误（Radio Link Failures，RLF）：当出现 RLF 后，很多情况下，连接都可以在掉话之前重新建立起来。这个特殊过程可以为用户掩盖 RLF，因此虽然单纯的 RLF 也是移动性问题的一项指标，但并不如掉话重要。此外，连接重建只在 LTE 网络内部出现，不会牵涉到其他相关的目标 RAT。

3）最小化不必要切换：不必要切换的一个最典型的例子就是乒乓效应，即短时间内在两个小区之间重复切换。不必要切换会导致网络资源使用效率的降低。并且，由于切换过程会降低用户吞吐量，因此这种移动性问题也会给用户体验带来影响。

4）最小化空闲模式问题：为了能在任何时候立即配置一次连接（通过从网络端进行呼叫，或者从 UE 端随机接入），正确的小区重选是必要的。所以，MRO 必须保证用户在任何时候都预占了一个合适的小区。

5.1.2　小区改变和干扰的挑战

小区改变的启动一方面是无线方面的原因造成的，即基于信号强度和信号质量，另一方面是其他策略原因造成的，这些策略会在下面阐述业务调整时加以总结。业务调整和其与 MRO 的交互将在下节讨论，本节集中讨论无线方面的原因。

首先，小区改变分为两类，这两类的主要区别是由干扰环境造成的，即同频和频率间的小区改变，后者还包括不同 RAT 间的情况。

对于同频移动性，即在两个使用相同载频的 LTE 小区之间进行小区改变，源小区和目标小区会互相干扰。当用户从当前服务/已选 LTE 小区 A 移动到目标 LTE 小区 B 时，不仅源小区 A 的信号强度会减弱，目标小区 B 产生的干扰也会增强。这就会导致信号质量会比信号强度降低得更快，因此即使源小区信号很强，只要目标小区比源小区更强，小区改变就有必要。图 5.1 的上图示意了一个 UE 从源小区 A（黑色）移

动到目标小区 B（灰色）时的信号强度（虚线）和 SINR（实线）。注意图中两个 y 轴的 dB/dBm 范围是相同的。虽然信号强度总会比理论噪声（在 -123dBm 的范围内）要高，一旦目标小区 B 的信号强于源小区 A，SINR 也会变得很低。

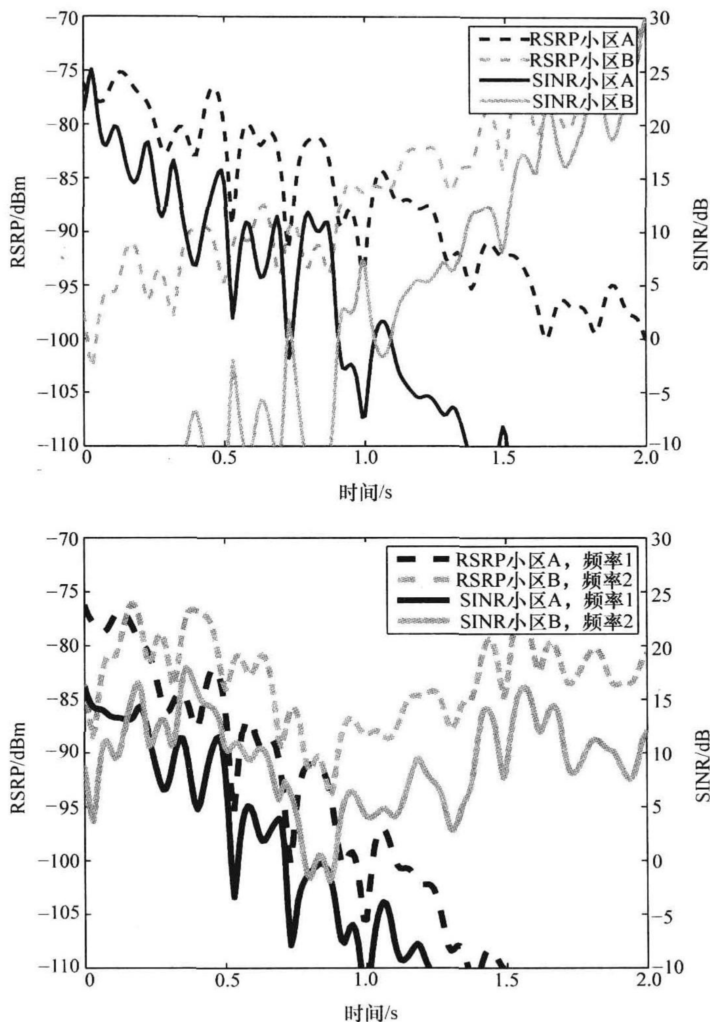


图5.1　终端从小区 A（黑）移动到小区 B（灰）时的信号强度（RSRP，虚线）和 SINR（实线）
［上图：同频（A 和 B 使用相同载频）；下图：频间（A 和 B 使用不同载频）］

所以，不管当前小区信号的绝对强度有多大，只要一个新的小区优于当前小区，同频切换就需要启动。图5.2 描述了一个邻基站间距为 500m 的六边形网络的一部分，图中显示了两个 eNB，发射功率为 46dBm。深色区域表示在该区域内 UE 可以自由选择接入哪个小区，通常把它当作切换区域。相反地，浅色区域表示在该区域内 UE 只能连接一个小区，否则这个小区会产生很强的干扰。不管发射功率有多高（通常能覆盖 1km 或更远），邻基站距离有多近，切换区域都非常有限。因此小区选择必须在

十分精确的时间内进行，尤其是对于高速移动的终端。值得注意的是，为了生成这个图，还假设了所有小区是满负载的，并且切换区会随着负载的减小而略微增大。



图 5.2 同频切换区域（深灰色/黑色，浅色阴影表示在该区域中用户只能连接某一个小区）

同频移动性的另一个重要特征是 LTE 终端会不停地测量使用相同载频的邻小区。最后，通过利用 X2 接口，同频切换准备时间可以非常短。

在频间场景下，源小区和目标小区使用不同的载频，因此不会互相干扰。从干扰环境方面来说，就是小区从一个 LTE 频率层变到另一个频率层，从一个 RAT 变到另一个 RAT 的小区改变（如从 LTE 变到3G）也属于这种情况。由于信令的不同，常规的频间场景和不同 RAT 间场景将会分别讨论。有如下一些特殊情况：

1）同基站部署不同频段，如同基站 3G/LTE，或者两个 LTE 的载频（如果一个运营商拥有不连续的 LTE 频段）：如果两个频段间距并不远，那么这两层的无线电波条件在各层上都会非常相似。只要这两层都能提供满覆盖，由这两层之间无线方面的原因导致的小区改变就不是必须的。图 5.3 所示的是一个同基站部署的例子，其中两个频率层之间的传播条件几乎没有差别（仅仅是小区边界形状不同）。在这个例子中，UE 在整个平面都能连接到其中一个频率层。



图 5.3 同位置异频部署（用户可以在任何地方连接各层）

2）覆盖层加容量层，如 800MHz 的 LTE 覆盖整个区域加 2.6GHz 的 LTE 覆盖高密度区域，或者宏小区层加上独立的微微小区/家庭小区频率层：在这种场景下，（至少）有一个层会限制覆盖，当 UE 离开某一层的覆盖时，必须进行小区改变。单纯从 MRO 的目标来看，所有 UE 最好能一直在覆盖层里，因为这样（几乎）能彻底消除对切换的需求。但是这显然不是一个合理的解决办法，因为必须通过其他机制（业务调整，参见 5.2 节）把业务卸到容量层。图 5.4 就显示了这么一个网络，它下层是覆盖层，而上层仅仅由一些低功率热点小区组成。黑色的区域是没有被上层所覆盖的。当连接在上层的 UE 离开浅色区域时，必须进行小区改变，但是也应该尽可能地利用



图 5.4 覆盖层（下）和容量层/热点（上）的部署

容量层覆盖。

通常，频间切换必须在某层的信号强度和/或信号质量变差，另一层的信号强度/质量足够好的情况下进行。图5.1的第二部分示意了在UE移出频率层1的小区A的覆盖范围的场景下，信号强度和SINR曲线的变化趋势。

跟同频测量相反，频间（包括不同RAT间）测量不会随时在每个终端上进行。这是因为这些测量需要测量间隙及振荡器必须调到其他频率上。而在测量间隙期间，不能对UE进行调度，导致数据速率会降低。因此，必须十分经济有效地进行测量配置。跟同频移动性测量相比，在频间移动性中进行测量显得更为重要。即使UE没有注意到其他的频率层，掉话也可能发生。

在为LTE内的频间切换做准备时，也可使用X2接口，因此跟同频切换类似。然而，RAT间切换需要通过核心网，从而准备时间会很长。在启动它们的时候必须考虑到这一点。

总的来说，本节讨论了同频移动性和RAT间移动性所带来的挑战。小区改变在同频的场景下必须更精确，而在频间的场景下会有更多的自由度。然而由于移动性测量带来的开销比较大，解决后者的移动性测量问题显得更为迫切。在RAT间切换这个特殊场景中，还需考虑到准备时间较长的问题。

5.1.3 MRO相关参数

本节将回顾LTE的移动性过程。由于重点放在对MRO十分重要的相关参数上，所以本节不会对LTE移动性的具体细节进行描述。一些方面还会在5.2节阐述业务调整时重新用到。

在空闲模式下，小区重选判决由UE及其行为以及3GPP规定的参数来完成的。在连接模式下，切换判决基于UE的测量结果是在eNB（或者分别是RNC/BSC）中进行的；并且在此模式下，相关策略和参数原则上是由供应商来规定的。然而，这都是假设了切换判决直接遵循UE测量报告。eNB为这些报告配置了触发器，以便在满足特定条件时能对报告进行发送。或者，eNB也可以强制UE进行周期性报告，但这要么会带来较大的开销（如果周期较短），要么会错过合适的切换时机（如果周期较长）。因此，通常会假设改变测量报告配置能影响切换行为。甚至在周期性发送测量报告或者由供应商规定切换判决的情况下，内部规则也很可能会遵循相似的原则。

本书中也采用了这个假设。表5.1总结了在连接模式下，不同移动性场景的相关测量报告事件。实际的实施可能跟表中所述的有区别，但它可以作为下面所述内容的一个基准。跟前面所述一样，这里只考虑LTE内的移动性和LTE到其他RAT的移动性。相关参数用斜体表示。一些参数可以以小区特定的方式进行配置，即一个小区可以独立配置它的每个邻小区，这样每个小区边界可以独立进行优化。注意，eNB可以额外配置更多的测量报告事件，用于其他目的，诸如MDT或者ANR，这些事件甚至可以是同一类型的。

对于每个测量报告事件，有两个参数是用来对抗信道的波动的。注意，这些是每个事件中都存在的，并且不是小区特定的，即一个小区会使用相同的值而不考虑所检

测的邻小区的条件。

表 5.1　MRO 相关的空闲模式参数和事件

源	目标	事　件	注释
LTE f1	LTE f1	A3：邻小区的补偿比当前服务小区的要好	同频，小区专用
LTE f1	LTE f2	A5：当前服务小区比门限 1 要差，邻小区比门限 1 要好	频间，小区专用
LTE	2G/3G	B2：当前服务小区比门限 1 要差，不同 RAT 间的邻小区比门限 2 要好	RAT 间，非小区专用

1）时间触发（Time To Trigger，TTT）：在相应的环境匹配之后，并不会立刻发送一个报告。而是环境在一定周期内都匹配时才发送，这个周期用 TTT 来表示。这就避免了切换由不准确的测量触发产生。较长的 TTT 能带来更稳定的行为，但是会给 HO 判决带来延迟，以至于给快速移动的 UE 造成不必要的麻烦。

2）滤波系数（Filter Coefficient，FC）：UE 在层 1 中引入了滤波，用来平衡快衰落。3GPP 中没有规定这个实际的过程，它的平均时长为 50～200ms。然而，UE 必须外加一个递归平均器来进行层 1 的测量，这个时间常数由 eNB 通过滤波系数指示来配置。这个指示和时间常数的关系在图 5.5 的右图中给出。这种稳定的测量比 TTT 更直接，因为它在环境被检测之前，就使测量结果更平滑。跟 TTT 类似，较大的时间常数会带来测量延迟，从而导致快速移动用户的切换判决危害正确的移动性。值得注意的是，当配置周期报告时，也可以在网络端进一步求平均，但是在 UE 端求平均会极大减少信令开销。

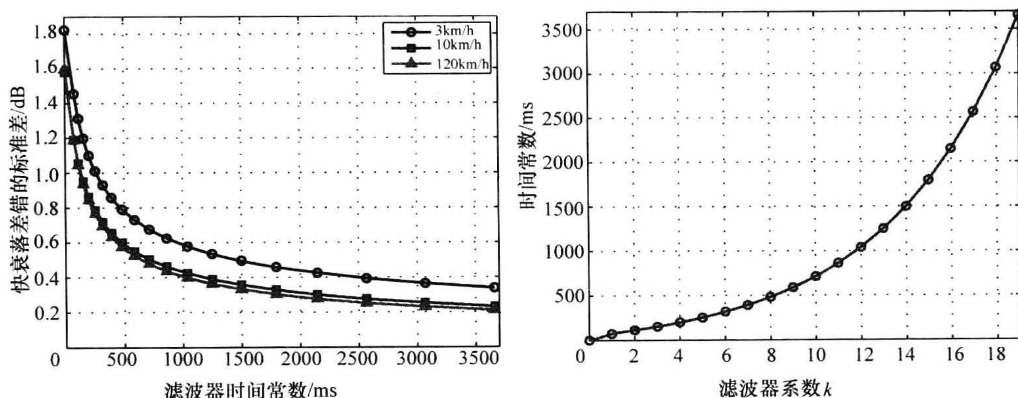


图 5.5　层 3 滤波对 RSRP 测量波动的影响（只考虑快衰落的影响见左图）和滤波器时间常数与层 3 滤波系数的关系（见右图）

图 5.5 描述了参考信号接收功率（Reference Signal Received Power，RSRP）测量错误的标准差和层 3 滤波器的时间常数之间的关系。这里只考虑了残余快衰落的影响，而忽略了由噪声估计导致的误差。如果没有层 3 滤波器（时间常数为 0），标准差就相当大。增大平均时间，标准差就会减小。图 5.6 进一步揭示了不同等级信号强

度的测量结果。浅灰色虚线表示一个 $3\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 信道的瞬时信号强度。黑色虚线是层1的测量情况，它的波动很大，会导致切换判决的不稳定。实线表示层3的输出，它会用于事件条件。更高的滤波系数使测量结果更平滑，然而这明显会延迟以下信道的性能：例如，当 $k=11$ 时，图5.5所预测的时间常数约为850ms，当 $k=11$ 时，这可以被层1和层3之间的平均延迟分辨出来。另外，极限的滤波系数同样开始对慢衰落求平均，但这并不是一个预期的行为。在这两张图中，除了快衰落的影响，都没有假设存在进一步的测量误差，如噪声估计产生的误差。

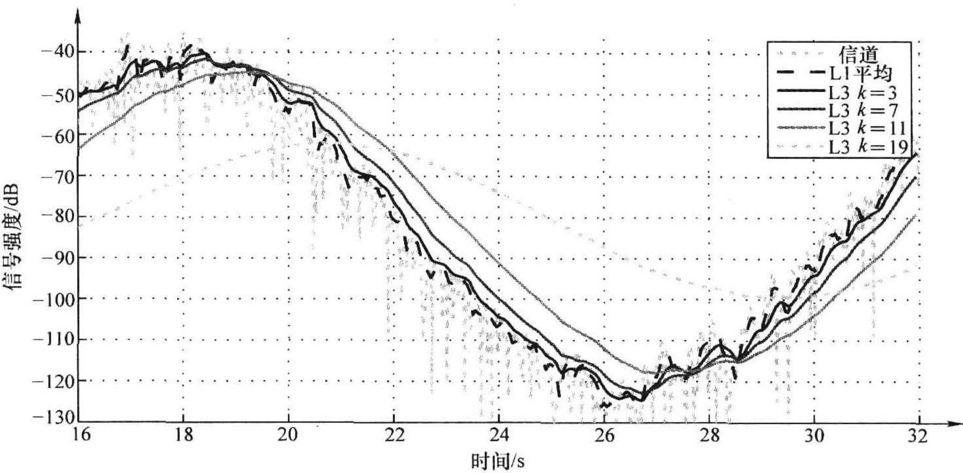


图5.6　不同等级的RSRP测量：平坦信号，不同滤波系数下的层1平均和层2平均

在连接模式下，每个UE在连接设置完成后，切换完成或者试图更新参数的任何时候，都会通过RRC信令独立发送配置报告，因此原则上每个UE可以用独立的参数进行配置。但是，参数的选取很大程度上依赖于小区边界的地理环境（阴影、街道等），所以同一个小区的UE通常使用同样的参数。此外，UE的一些特性变化很快，如速度，因此几乎没有时间对一个UE进行特定的优化。但是，小区之间将会使用不同参数，如前面所述，对于小区组合，存在一些特定的参数。

在空闲模式下，小区重选参数在系统信息块（System Information Block，SIB）3上进行广播，所以这些参数不能是用户特定的。前面提到，3GPP规定了空闲模式下的行为。除了类似于连接模式下的门限参数外，每个频率层还分配了一个重选优先级，这个优先级会影响频间场景下的重选行为。表5.2总结了最相关的一些空闲模式参数。

表5.2　MRO相关的空闲模式参数和事件

源	目标	参数和描述	注释
LTE f1	LTE f1 （或者具有优先级的 f2 ）	相邻小区的 Qoffset 比当前服务小区好	同频，频间
LTE f1	LTE/3G/2G f2 较高优先级	f2 上的小区优于 $\text{Thresh}_{x,high}$	频间，RAT间

（续）

源	目标	参数和描述	注释
LTEf1	LTE/3G/2G f2 较低优先级	当前服务小区差于 $Thresh_{serving,lows}$，且 f2 上的小区优于 $Thresh_{x,low}$	频间，RAT 间

跟连接模式下的 TTT 一样，空闲模式下有个类似的定时器叫 Treselection，用来避免由不准确地测量导致的重选。这样的定时器在每个频率层上可能有区别。

如果一个 UE 预占的某个频率层比其他层的优先级要低，它就需要对更高层进行常规的频间或 RAT 间测量。明显地，上面说过，连接模式下的测量对吞吐量没有影响。然而，空闲模式下过于频繁的频间和 RAT 间测量会减小电池寿命，因此需要进行较为经济的配置。

对于连接模式与空闲模式下所有门限的配置，要么依据信号强度（LTE、3G 以及 2G 中的 RSRP、RSCP 和 RXLEV），要么依据信号质量（LTE、3G 以及 2G 中的 RSRQ、EcNo 和 RXQUAL）。信号质量包括干扰的信息，因此看起来更相关。但是基于定义方式，它依赖当前服务小区的负载。对于 MRO 来说，这种依赖是不必要的，如当观察一个目标小区的 RSRQ 时。图 5.7 示意了 SINR 和 RSRQ 之间的负载依赖性的关系，图中还增加了一条固定斜率的直线作为参考（黑色虚线）。当 SINR 达到 8dB 时，相同 SINR 下的 RSRQ 测量结果会因为负载不同而变化。例如，当 SINR 为 8dB 时，若一个 UE 开始在一个空小区（0% 负载）下载数据，然后系统分配了所有的资源（100% 负载）给它，即使 SINR 和 RSRP 都没有改变，它的 RSRQ 就会减小。如果有乒乓效应，则显然不利于对信号质量的利用，特别是在负载较低的小区里。此外，这还使 RSRQ 方面的合理门限配置变得复杂。

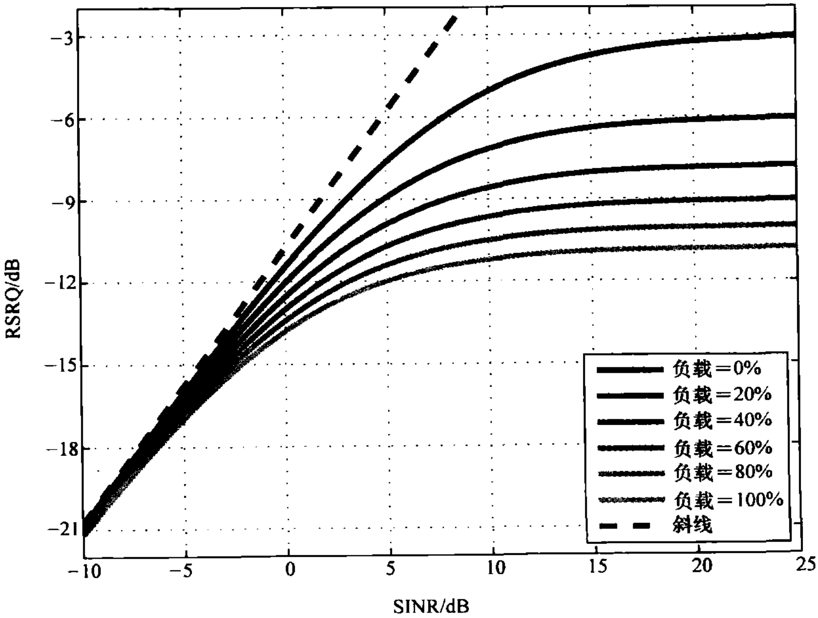


图 5.7 负载对 RSRQ 测量的影响（跟固定斜率直线作比较）

本章关于 MRO 剩下的部分将集中在连接模式下讨论。因为空闲模式下的问题相对来说不及连接模式下的重要。此外，3GPP 中的 MRO 也集中在连接模式下，因为空闲模式配置可以根据优化了的连接模式配置而推出来。空闲模式下移动性过程会在阐述业务调整的 5.2 节中进一步讨论。

5.1.4 移动性问题的起因

本节将详细阐述切换问题。在 3GPP 中已经对切换分类进行了研究，本书采用相同的分类：过早切换、过晚切换、切换到错误的小区和不必要切换。每一类都会在同频切换这种最有挑战的情况下分别进行讨论。关于怎么应用到频间场景和 RAT 间场景，也进行了说明。

图 5.8 的左图描述的是一个过晚切换。UE 正连接在左边的小区 A，然后向右边的小区 B 移动。小区 A 启动切换过程太晚，或根本没有启动，以至于 UE 会在小区 A 中出现一个 RLF。此时就会引入前面提到的 LTE 连接重建立过程。在出现 RLF 后，一个 LTE UE 会试图与能搜索到的最强 LTE 小区重新建立连接，即小区 B。具体为在过晚切换的场景中，UE 会给右边的小区 B 发送重建立请求。注意，本节不考虑连接重建过程是否成功。

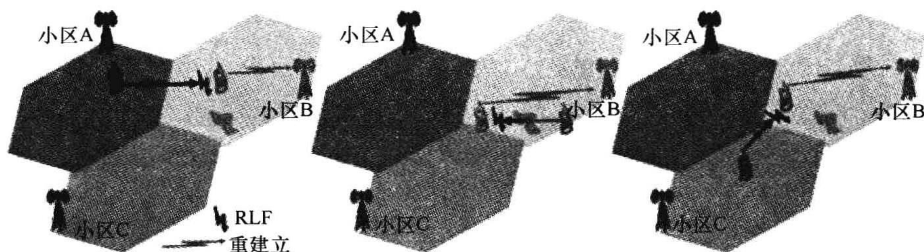


图 5.8 RLF 相关的移动性问题：过晚切换（左）、过早切换（中）和切换到错误小区（右）

过晚切换是最常见的移动性问题，但是切换也可能会启动得太早。通常，如果需要切换到一个连接不足够稳定的小区时，会出现过早切换。图 5.8 的中图就是一个过早切换的例子：一个 UE 正连接在右边的小区 B 中，它向一个很小的覆盖岛小区 A 移动。这些覆盖岛的出现通常是覆盖过重的结果，或者存在一个很强的阴影衰落。此时小区 B 就会启动切换到小区 A。在一些情况下，这种切换到这样一个不稳定小区的切换过程并不会成功，从而 UE 仍然连接在小区 B 上，而不出现 RLF。另一些情况下，切换可能会成功，并有足够的时间再切回到小区 B。然而，很多情况下，UE 在刚从小区 B 成功切换到小区 A 之后，且尚未切回到小区 B 时，左边小区 A 就会出现 RLF。和过晚切换情况一样，UE 也会给右边的小区 B 发送重建立请求。值得注意的是，从小区 B 的角度来说，过早切换和过晚切换是一样的，因为它不能区分 UE。这两种情况都会收到一个来自未知 UE 的重建立请求。关于过早切换，一个具体而直观的例子将会在后面展示仿真的内容中进一步讨论（参见图 5.16）。

涉及 RLF 的最后一类是切换到错误小区。图 5.8 的第三部分给出了一个例子。

UE 正连接在下面的小区 C 上，向右边的小区 B 移动。因为一些可能的原因，小区 C 本应该启动切换至小区 B，却切换到了小区 A。这可能也是因为小区 A 存在一个覆盖岛在小区 B 中，或者因为存在其他严重的阴影。在切换成功后，如果 UE 在正确切换到小区 C 之前信号严重衰落，UE 可能会在小区 A 中出现 RLF。UE 将给小区 B 发送一个重建立请求，就像过早切换和过晚切换的情况一样。

前面的解释是基于所有小区都是同频的 LTE 小区的假设上的。如果 LTE 小区之间的频率不同，实际上也会出现同样的问题；惟一不同的地方是潜在的无线问题的根本原因不是干扰，而是前面所述的可能的覆盖损失。同样在 RAT 间场景下，问题也是类似的。最大的不同在于这种场景下不发送重建立请求，如果 UE 在遇到 RLF 之后，一直没有搜索到 LTE 小区，RLF 就会导致掉话。相反地，更高层将对可用小区初始化一个即时重连接，就和重建立类似。

还有一些移动性问题与无线链路错误无关，称为不必要切换。正如前面所述，这一类移动性问题相对不重要，因为这对用户体验的影响很有限。但是，它们会给网络带来不必要的开销，因此同样应该避免。它分为如下 4 种场景：

1）乒乓效应：小区 A 使一个用户切换到小区 B，小区 B 在很短的时间内又让这个用户切回到小区 A。在大部分情况下，这两次成功的切换应该被避免，如引入一个较长的切换延迟。图 5.9 的左图显示了两种乒乓效应的场景。

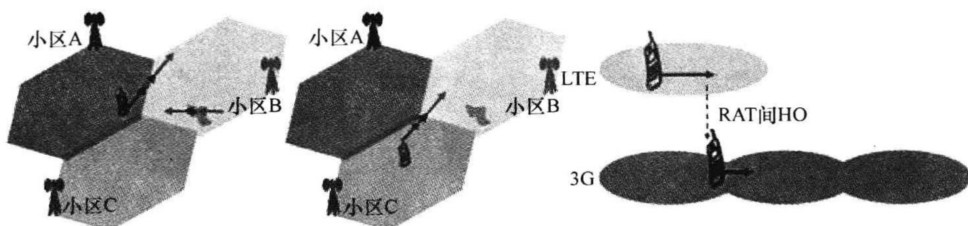


图 5.9　不必要切换乒乓效应（左图）、短暂停留/快速切换（中图）以及不必要切换至低优先级层（右图）

2）短暂停留/快速切换：小区 A 让用户切换到小区 B，小区 B 又在很短时间内让这个用户切换到小区 C。在一些情况下，通过直接从小区 A 切换到小区 B，可以省去这两次切换中的一次。图 5.9 的中图给出了一个例子。

3）从较高优先级频率层切换到较低优先级频率层的不必要切换：在 3GPP 中，不必要切换这个术语还包括这样一种场景——某个频率层（通常是高优先级的）让 UE 切换至其他目标层，即使 UE 还停留在之前那个源层中。结果，源层的覆盖就不能得到充分利用。图 5.9 的右图示意了 UE 在离覆盖边缘较远的地方就进行了不必要 LTE 切换的一个例子。

4）连接后立刻切换：假设一个空闲用户预占了小区 A，并连接上了网络。这个 UE 将连接上小区 A，但是小区 A 启动切换，使它切换至小区 B。这表示空闲模式和连接模式的参数校准不当。大多数情况下，这种切换是可以避免的。

独立的小区边界问题通常受到上面提到的切换问题中的某一类控制，特别是像街

道这样，有大量用户在同一个位置、以同样的角度和相近的速度跨过小区边界。在这种场景下，如果只存在过晚切换，则 MRO 的潜在优势就十分明显。否则，如果小区边界既有过早切换又有过晚切换，改善其中一方面势必导致另一方面更加恶化，所以 MRO 的优势会有所减弱。这个结论将会在下面的仿真结果中得以进一步揭示。

5.1.5 MRO 解决方案

值得一提的是，MRO 在过去早已使用过，但并不是让其自动实施。当时都是人工通过全面观察网络关键性能指示以及路测数据来实施的。这些统计数据结合了地理信息以及人们之前的经验。对于最关键的小区边界，在很多情况下，建议根据试验和差错过程进行改变：

1）针对 MRO 的自动 SON 解决方案要自动化当前的人工操作；

2）优化更多/所有的小区边界（不仅仅是优化关键的边界）；

3）更频繁地进行优化（要保持对网络变化的持续反应能力）；

4）基于更好的统计（使数据更可靠并更少依赖人类经验）；

5）支持分散式的解决方案（以降低核心网的复杂度）。

MRO 问题可以分成两个子任务，即根本原因识别/评估和实际的移动参数校正。3GPP 主要处理了前一个问题，并假设后一个问题具有设备商特定的属性。在很多方面，准确识别根本原因比实际校正要更富有挑战性。

3GPP 还规定了多设备商的管理（如开启和关闭 SON 功能，靶电压调整）以及对 3GPP TS32. 522（2011）中 MRO 的性能监视。

5.1.5.1 根本原因识别

根本原因识别的一个通例就是识别“责任”小区和识别移动性问题的类型。“责任”小区是指会产生特定移动性问题的小区，应该自适应调整自身参数。如果考虑分布式的 MRO 解决方案，同样应该把信息带给责任小区，使它能自适应调整其参数。这个自然已经实现了，因为惟一识别根本原因需要责任小区的信息。

前面所述的过晚切换的一个简单例子，可以用来阐述根本原因评估的难度。假设有一个从小区 A 切换到小区 B 的过晚切换场景，即移向小区 B 的过程中切换没有发生。从小区 A 的角度来说，它只是简单地在还没有启动或刚刚启动切换时，就与 UE 失去了联系。此时，虽然小区 A 是一个责任小区，但它并没有进一步的信息。如果小区 B 收到重建立请求，它就知道这个 UE 在其他小区中出现了 RLF，但是也不知道进一步的历史消息。根据前面讨论的内容，这还无法使小区 B 确定根本原因，因为这既可能是来自小区 A 的过晚切换，也可能是来自小区 B 自身的过早切换（它不能辨认出 UE，因为此时小区 A 已给它分配了一个新的标识），或者来自于第三个基站的错误切换。

一个惟一根本原因评估需要两个组成部分：

1）UE 端要能够知道移动性问题的大部分信息，因此额外还需要 UE 需要上报一些信息。

2）每个小区都有一些关于 RLF 的信息，因此在找到责任小区之前，各小区必须

转发它们的信息。

这两个组成部分显然都需要标准化的支持。一个纯粹的设备商特定的解决方案不会进行惟一根本原因评估。接下来，我们将介绍不同的 3GPP 版本怎样帮助解决这个问题。

R8 中已经有了连接重建立过程。UE 发送给最优 LTE 小区的重建立请求已经包含了之前小区的有用信息，特别是 UE 在之前小区的 C - RNTI（这个信息是 UE 在之前小区的标识），还包含了物理层小区 ID（Physical Cell ID，PCI）。

R9 引入了如下特性：

1）RLF 报告：一旦重建立过程成功，新的小区就可以请求 UE 报告在 RLF 发生之前的最后一次测量结果。

2）RLF 指示：当收到重建立请求时，小区可以把这个信息通过 X2 接口转发给之前的小区。这是假设了之前的小区是邻居小区，这样才有足够的 PCI 来惟一识别之前的小区。只要 C - RNTI 存储了 UE 的上下文信息，之前的小区就可以在 C - RNTI 的帮助下辨认出 UE。在此目的下，系统会强迫小区在跟终端失去同步后的某个特定时间里存储 UE 的上下文信息。在收到重建立请求后，或者收到 RLF 报告后（伴随着成功的重建立），就可以发送 RLF 指示。所以，这个过程不需要 R9 中的高能力终端。

3）切换报告：之前的小区在收到 RLF 指示后，通过对 RLF 指示和它本身的信息进行合并，来对这个事件进行评估。如果它对此次 RLF 没有责任（如过早切换或切换到错误小区的情况），它就通过 X2 接口发送一个切换报告给责任小区。实际上，它会检测相关 UE 是否预先成功进行了切换。如果是，则它会假设根本原因就是这次成功的切换（过早切换，切换到错误小区）。切换报告尤其会包括移动性问题的根本原因，这个移动性问题是由之前连接的小区主导的。由于切换报告通常是出现在成功切换之后，因此可以假设相关小区都是邻小区，存在 X2 接口。

如果相关的小区已经收到重建立请求，并且支持这些特性，那么这些特性能惟一检测出过早切换、过晚切换和切换到错误小区。此外，这个过程还确保了相关问题和其根本原因已经通知给了责任小区。下面的图在信息顺序图的帮助下，阐述了过早切换、过晚切换和切换的错误小区的识别。

第一张图（见图 5.10）描述了过晚切换检测。UE 从小区 A 移动到小区 B，出现了 RLF（1），然后发送重建立请求（Re - Establishment Request，RER，2）给小区 B。小区 B 会在 RLF 出现之前请求包含测量结果的 RLF 报告（为了简便，图中没有显示）。小区 B 通过 RLF 指示把检测到的 RLF 通知给小区 A（3）。小区 A 发现这个终端近期没有进行切换，所以小区 A 就知道出现了一个"过晚切换"问题。

下一张图（见图 5.11）描述了过早切换检测。UE 从小区 B 移动穿过了小区 A 的一个覆盖岛。它可以成功地切换到小区 A（1）中，但是会在（2）之后立刻出现一个 RLF，进而发送重建立请求给小区 B（3）。小区 B 通过 RLF 指示把这个 RLF 通知给小区 A（4）。小区 A 发现近期出现了一次切换，这次切换发生在很短的时间之前，以至于它没有机会存储 UE。所以，它会通过 HO 报告通知小区 B（5），出现一个过早切换。

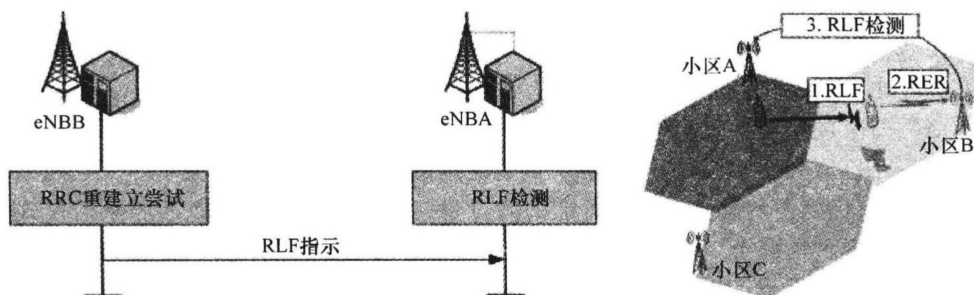


图 5.10 过晚切换的信息序列图（Holma 和 Toskala，2011，经 John Wiley & Sons，Ltd 允许重新绘制）

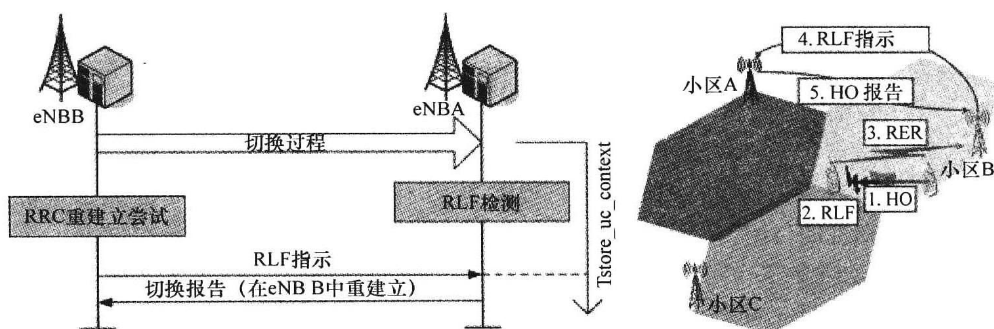


图 5.11 过早切换的信息序列图（Holma 和 Toskala，2011，经 John Wiley & Sons，Ltd 允许重新绘制）

最后一张图（见图 5.12）描述了切换到错误小区的检测。UE 从小区 C 移动到小区 B，途中很靠近小区 A。它成功地切换至小区 A（1）中，但在（2）之后立刻出现一个 RLF，进而发送重建立请求给小区 B（3）。小区 B 通过 RLF 指示把 RLF 通知给小区 A（4）。小区 A 发现近期出现了一次切换，这次切换发生在很短的时间之前，以至于它没有机会存储 UE。所以它利用 HO 报告通知小区 C，出现了一次切换到错误小区。

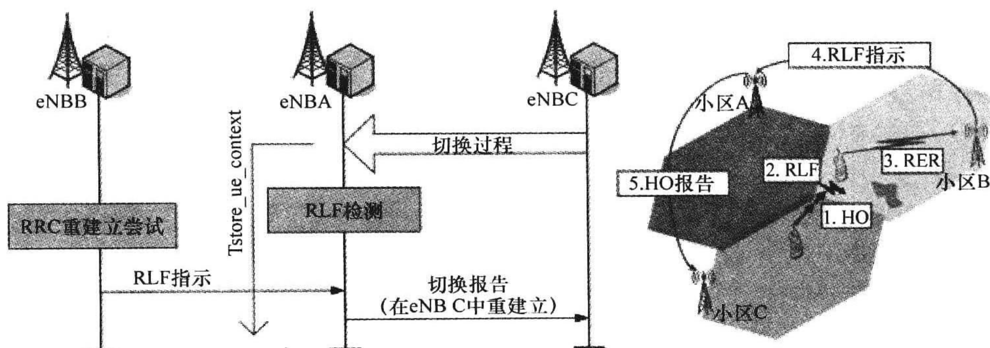


图 5.12 切换到错误小区的信息序列图（Holma 和 Toskla，2011，经 John Wiley & Sons，Ltd 允许重新绘制）

R9 中没有讨论乒乓效应，因为它们可以从 UE 历史信息中读取出来，在切换过程中，这些历史信息跟 UE 上下文信息一起在小区之间进行交换。UE 历史信息还包含了这个 UE 在每个小区中所待的时间。对于乒乓效应来说，即“小区 A—小区 B—小区 A”，UE 的历史信息会告诉小区 A，UE 在不久之前已经在小区 A 中了。值得注意的是，小区 A 不能辨认出这个 UE，因为之前的 C - RNTI 已经丢失了。

R9 没有提到空闲模式，一个可能的假设是，空闲模式参数可以参照激活模式参数，因为这两种情况至少在无线条件和用户移动方面十分类似，并且需求也不是很严格（空闲模式可以支持更差的无线条件）。这同样避免了连接后的不必要切换。

R10 扩展了 RLF 报告。R9 中的相应过程是建立在重建立请求成功的基础上的。然而即使是请求成功了，而重建立过程并没有成功（UE 因此进入空闲状态），包含额外测量结果的 RLF 报告也会丢失。因此，R10 对 RLF 报告进行了扩展，这样它能在 UE 进入空闲状态之后得以发送。

然而，R9 和 R10 中的 SON 主要集中在 LTE 内的 MRO 中，R11 会引入 RAT 间的特性。跟 R9/R10 中的相应过程类似，R11 会支持合适的 UE 报告和信息在小区之间进行交换（或者扩展已有的过程）。值得注意的是，在 2G 和 3G 中，负责无线节点是 BSC 和 RNC，而不是基站；RIM 过程已经在 RNC 与 BSC 之间用来为负载均衡服务，因此基于移动性的目的，RIM 过程也可以在 eNB、RNC 与 BSC 之间的接口使用。

5.1.5.2 移动性参数纠错

实际优化步骤，即移动性参数的纠错，在很大程度上是设备商特定的。如图 5.13 所示，集中式解决和分布式解决都是可能的。值得注意的是，3GPP 中用来进行根本原因评估的特性是分布式解决方案。在任何情况下，纠错通常不会基于独立的事件，而是基于统计数据。每个小区会统计已识别的切换问题的数量，这些切换问题是在一定的周期内由它自己产生的。那些关键性能指示（Key Performance Indicator，KPI）通常是分别为每个邻居小区生成的。

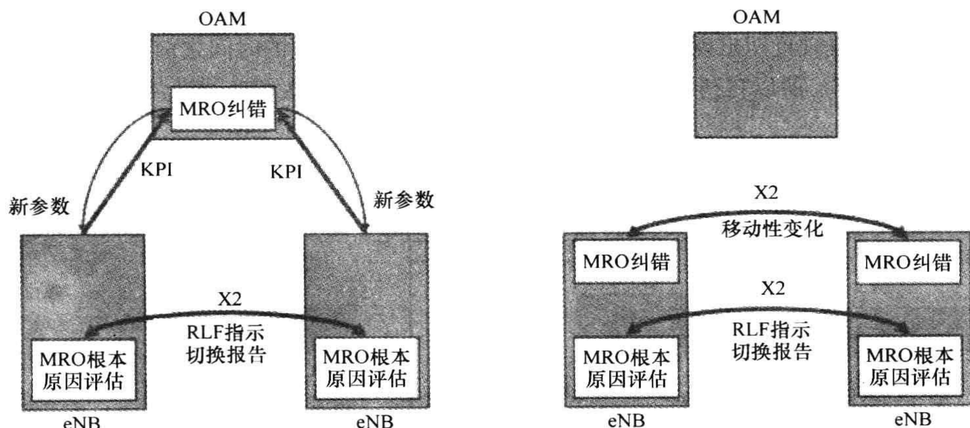


图 5.13 MRO 构架：集中式（左图）和分布式（右图）

在集中式解决方案中，小区报告那些 KPI 给 DM，然后让 DM 决定参数的改变。

其优势在于，DM 同样可以顾及来自其他小区的 KPI，因此可以做出更通用的判决。SA5 规定了北向接口上的必需 KPI，以支持多设备商解决方案。

在分布式解决方案中，每个小区独立地评估生成的 KPI，并根据它们得到参数的变化。其主要优点在于，它保持了单一节点（eNB、RNC 或 BSC）的 MRO 复杂度，每个 eNB 处理它自己的问题，并且 DM 不需要牵涉进来。此外，这种场景下的复杂度不由网络规模来决定。人们可能会质疑，这样的解决方案比基于 OAM 的解决方案需要更灵活的适应性，然而产生可靠的 KPI 数据会带来瓶颈，这些数据将在讲述或补充移动性改变过程的章节加以讨论，R9 引入了这个过程以进行移动性负载平衡。利用这种机制，小区可以把切换参数的改变通过 X2 接口通知它的邻居。这种协商同样能在分布式方案中用于跟邻居小区进行进一步协调。

虽然这种适应性是设备商特定的，这里还是给出了一些例子。表 5.3 总结了当一个特定的移动性问题决定小区边界时的可能行为。最后一列包含了与行为有关的具体参数变化。此表集中讨论的是 LTE 内的场景，不同 RAT 间的行为与不同频率间的行为类似，然而 3GPP 尚未提供不同 RAT 间的根本原因评估。

表 5.3 主要移动性问题和潜在的计数器测量

主要切换问题	行为	参数变化
过早（同频）	延迟切换	较大的 A3 偏移，较长的 TTT/FC
过早（异频）	延迟切换	较小的 A5 - Thresh1 和/或较大的 A5 - Thresh2，较长的 TTT/FC
过晚（同频）		较小的 A3 偏移，较短的 TTT/FC
过晚（异频）	提前切换	较大的 A5 - Thresh1，较小的 A5 - Thresh2，较短的 TTT/FC
切换到错误小区 B，而不是 C（同频）	提前切换	B 中较大的 A3 偏移和/或 C 中较小的 A3 偏移，较长的 TTT/FC
切换到错误小区 B，而不是 C（异频）	延迟切换到 B 且/或提前切换到 C	例如较大的 A5 - Thresh2 给 B，较小的 A5 - Thresh2 给 C
乒乓效应（同频）	延迟切换到 B 且/或提前切换到 C 延迟切换	较大的 A3 偏移，较长的 TTT/FC

就像已经讨论过的，当引入 TTT 和 FC 时，这两个参数均可认为是 UE 特定的。通常，快速移动的 UE 需要短的 TTT 或小的 FC，而移动缓慢的 UE 的需求与之相反。OAM 系统层面并不是都知道这种 UE 特定的属性，所以这种优化只能在 eNB 端进行。但是，这种方法需要速度估计，这并不容易实现。

5.1.6 MRO 时间尺度

就像很多其他自优化算法一样，MRO 提供一个控制循环，因此它需要确保可靠性不受到危害。MRO 判决是基于对过去的观察，所以必须选择合适的观察周期，以保证 MRO 判决后的用户移动至少跟这次观测的情况相似。例如，每天一次的 MRO 判

决会自然地假设用户的行为在周一、周二等时间段中是相似的。用数学语言来说，在某种程度上，稳定的 MRO 需要固定的行为。此外，大量的数据，即移动性问题样本，需要保持有效，以避免对不寻常的情况进行反应。这就意味着数据的采集需要覆盖一个很长的周期，虽然原则上分布式实施 MRO 可以进行很快的反应，否则就会面临恶化的危险，而不是移动性的改善。

在人口稠密的地区，统计数据应该覆盖几分钟，然而对于只有很少用户的区域，需要覆盖几小时，直到你采集到足够多的事件。用户移动行为通常会在忙时、从白天到晚上以及从工作日到周末时产生变化。所以，MRO 需求设计需要在稳定性和反映 UE 行为变化的性能方面进行折中。这个折中在图 5.14 中有所揭示。值得注意的是，那些稳定性需求可能比相关信令更限制 MRO 的灵活性。

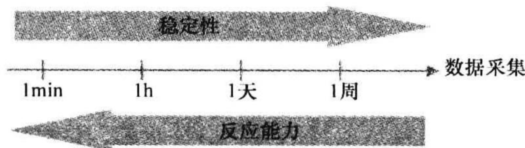


图 5.14　时间规模折中

基于 UE 速度估计的 TTT 和 FC 优化，可以认为是个例外。速度估计不仅能在切换时获得，比如还可以通过层 1 多普勒测量得到。如果认为那些是足够可靠的，纠错会比前面所述得更快。

作为对不同 RAT 间 MRO 的最后一点描述，UE 可能不会在出现 RLF 后立刻进行重连接。因此，空闲状态后再上报移动性问题将会延迟，MRO 观察周期应该要比那些延迟更大。

5.1.7　MRO 性能

再回到图 5.2，可以看到即使同一个边界上表现出来的阴影衰落情况也不尽相同，切换区域既可以很窄（可能会导致过晚切换），也可以很宽（可能导致乒乓效应或过早切换）。如果用户以不同的角度、不同的速度，在任意位置穿过这样的边界，结果所引发的问题，会是上述所有问题的混合问题。在这种场景下，MRO 的潜能会受到相当的限制。改善其中一种情况（如过晚切换），势必使另一种情况更为恶化（如过早切换）。但是，实际上小区边界常常受到特殊的用户移动的控制。例如，街道会迫使大部分用户，从一个特定的位置，以特定的角度甚至速度，去穿过小区边界。再举一个例子，小区边界也可能穿过一个拥挤的区域，这个区域里的用户几乎是静态的。所以，小区边界也受到特定类型的移动性问题的控制。MRO 可以在这些情况下进行较大改进。

因此，根据 3GPP TR36.814（2010）中所讨论的典型 3GPP 仿真，MRO 仿真不能基于随机且任意的用户移动。评估 MRO 性能需要更精确的移动性模型。2010 年，研究人员在 Turkka 和 Lobinger 选取了不规则小区布局场景来进行下面提到的性能评估。它包含了不同大小的小区，邻基站间距范围参照 3GPP 定义的场景，在 500 ~ 1732m 之间。所有用户的移动速度为 30km/h，下面是两个不同的移动性模型：

1）用户一律分布在网络中，进行任意且随机的移动。

2）用户一律分布在街道上，他们只沿着街道移动。

包含街道布局的小区布局由图5.15给出。采用了环绕式处理以减小边界效应。采用了位置独立的阴影衰落，并且所有研究所涉及的阴影衰落图都是相同的，即不存在阴影衰落图的重生成。上面已提到过，这对于MRO来说是必要的。总共有900个用户以30km/h的速度移动。由于仿真中已经确保了用户的普遍行为保持为常数（固定），所以在相当短的一段时间之后，就能得到稳定的统计数据。虽然像前面章节描述的那样，采集周期实际应该会更大，但这里只用了90s。如果采用的周期较长，则可以用天来计算，这会使仿真在时间上不可行。在每个90s的采集周期之后，MRO为每个小区边界决定相应小区的偏移是否应该改变。引入了0dB、0.5dB和1dB的纠错。在这之后，KPI数据会重置，在下一个90s之后，进行下一次判决。每个小区还会引入一个额外的3dB切换余量，有时候这会称为“滞后现象”。在默认设置下，如果来自邻小区的信号比当前服务小区强3dB以上，UE就会执行切换。时间触发器在这不会改变，它设为200ms。

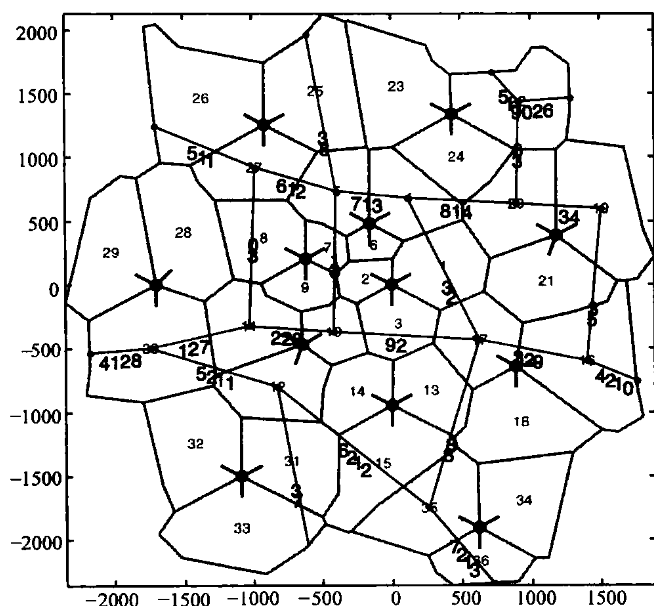


图5.15 不规则网络布局“Springwald”

在这样的仿真设置下，能得到一些结果来阐述本章所讨论的MRO特性。这里只假设了同频移动性，即所有小区都是在同一载频上运营的。这种情况，在干扰方面是最富有挑战性的。

在讨论统计性能结果之前，可以从上面描述的仿真设置中摘出关于过早切换的一个具体而直观的例子。图5.16所示的场景是从图5.15的不规则布局中摘录过来的，它显示了一个拥挤的街道穿过了一个覆盖岛，于是街道上两个方向的大部分用户都会越过小区边界。这两张图显示的是从小区5到小区2的过早切换事件（中间那张图是左图的放大）。右图显示了一个UE在两个小区中的RSRP（下）和UE连接的小区（上）。小区2的RSRP只在很短一段时间里超过了小区5，导致了切换的启动，然而

切换之后马上出现了 RLF。值得注意的是，这是由常用的随机阴影模型产生的一个“标准”覆盖岛。

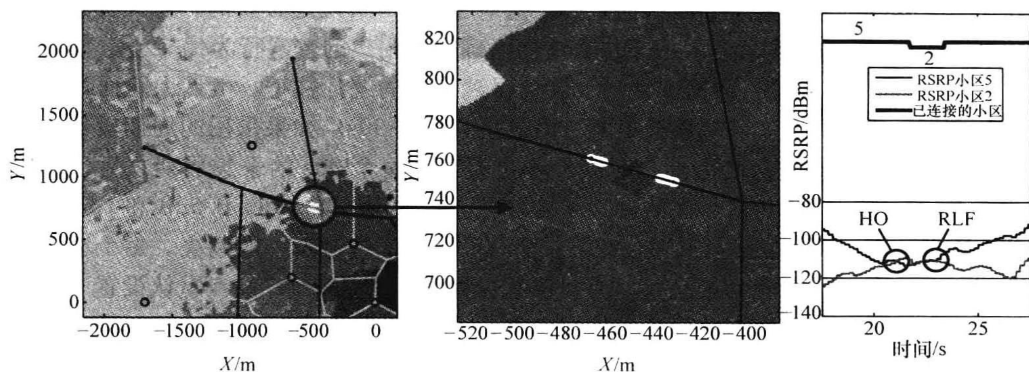


图 5.16　过早切换的具体案例（左图：网络的摘录；中图：放大到圆圈中的区域；右图：RSRP 和连接小区）

图 5.17 显示了所有 900 个用户都在街道上移动这种场景下的性能结果。x 轴从根

图 5.17　移动性问题随时间推移的演进［900 个用户以 30km/h 的速度在街上移动。无 MRO（左图）；简单的 MRO（中图）；考虑到乒乓效应的 MRO（右图）］

本上来说是时间轴，一个 KPI 采集间隔对应仿真中的 90s，而实际上这个时间可能是 1h 或者是一天甚至一周。y 轴显示了一些移动性问题的计数，这些移动性问题都在图例里面有指示。这个计数是在整个网络上进行累加的，即所有的小区边界。左图显示了没有采用 MRO 的场景作为参考。可以看出，所有的事件都在发生，“过晚切换”是和 RLF 有关的发生频率最高的事件，并且甚至有更多的乒乓效应。明显地，计数器不会根据时间而改变（除非是统计变化）。在中间那幅图中，引入了简单的 MRO 方案，但这个方案在进行切换偏移纠错时并没有考虑乒乓效应。RLF 减小了将近 50% 之多，所有的三种场景都得到了改善。在 5 ~ 10 个采集周期之后开始收敛，但最明显改善发生在前三个时间间隔内。不幸的是，这似乎是以乒乓次数的增多为代价的。右图引入了一个更高级的 MRO 算法，它考虑到了乒乓效应。现在，乒乓次数也减小了将近 40% 。但是 RLF 的减小受到了影响，如今只减小了 40% 左右。

图 5.18 显示了小区独立偏移是如何进行的。前面提过，采用了 3dB 的额外切换偏移。精度为 0.5dB 或 1dB，可以观察到收敛（在 5 ~ 10 个周期之后）。此外，在收敛之后，会发生 -6 ~ 6dB 的切换偏移，然而会导致更早切换的负偏移略微多一些。这和上述过晚切换发生频率更高这个事实所匹配。图中结果还论证了每个小区边界明显具有不同的优化偏移，这又一次强调了 MRO 的需求。

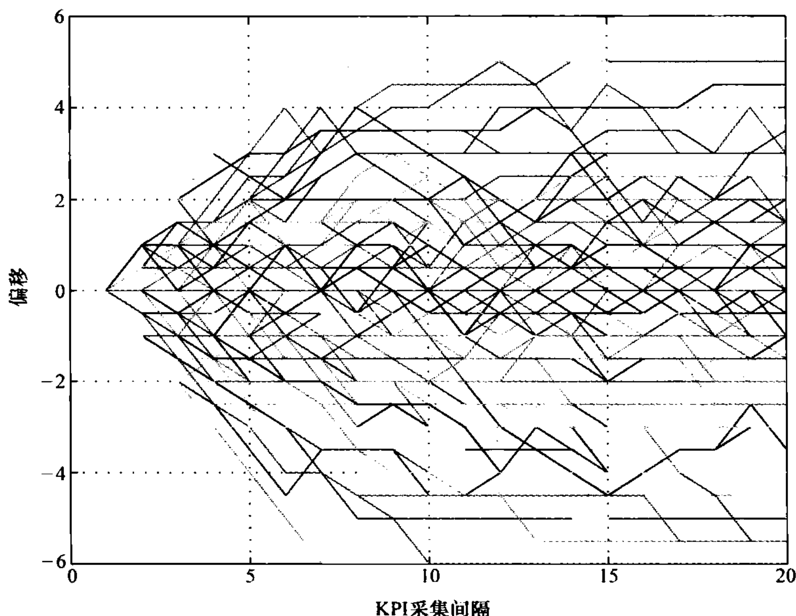


图 5.18 切换偏移演进

当研究独立的小区边界时，能得到进一步说明。图 5.19 选取了 3 个小区边界。对于其中的两个来说，主要存在一个问题，那就是从小区 29 到 16 的过晚切换和从小区 5 到 2 的过早切换。在这两种场景中，这些问题几乎可以完全避免。从小区 33 到 5，存在多种问题的混合，不过每种问题都处在较小的等级。在这种场景下，对 RLF

相关问题的改善更不明显。

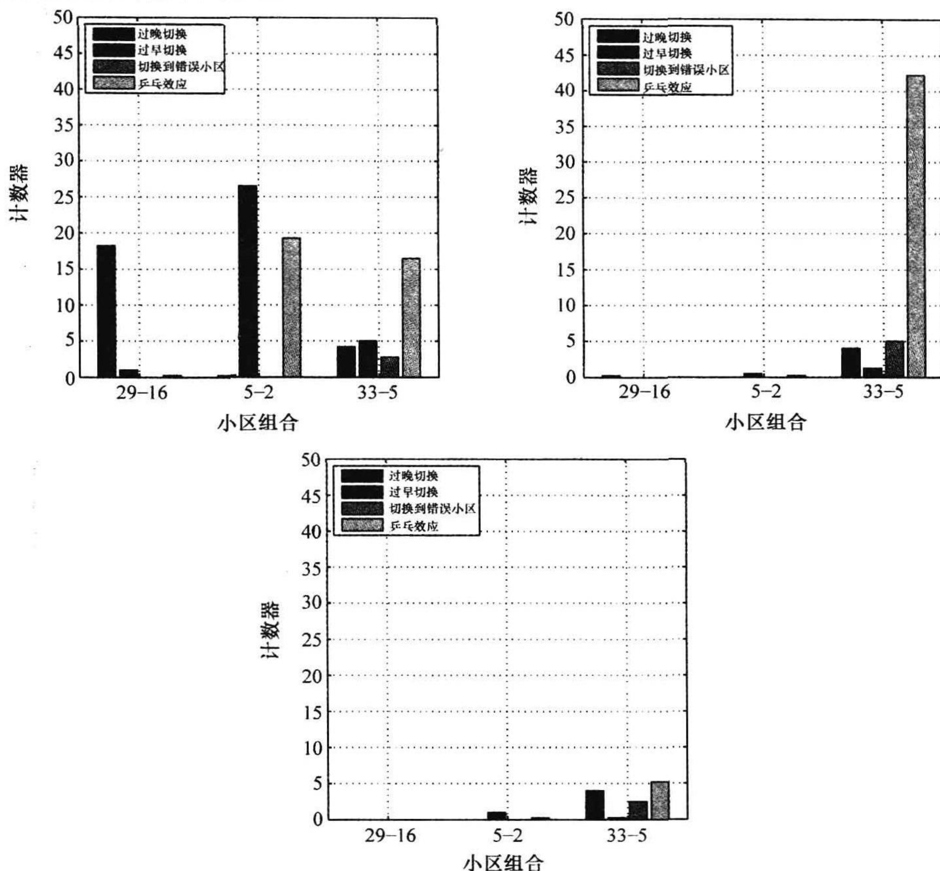


图 5.19　所选小区边界的移动性问题

下一张图（见图5.20）是每个小区边界 RLF 数量的直方图，既有没采用 MRO 的情况，也有采用了（收敛的）MRO 的情况。实际上，甚至没采用 MRO 时，很多小区边界也没有或者几乎没有 RLF，但是有一些小区却出现了很多 RLF。采用 MRO 后，没有一个小区边界会出现超过 100 个 RLF，并且不出现 RLF 的边界数量也大量增加。这突出了在某个特定位置上 MRO 增益可以非常大的事实，尽管其他很多位置都没有获益。

最后，图 5.21 是一张对比图，它显示了同样布局下的结果，但是所有用户的移动都是随机且任意的（“随机步行”，而不是在街道上移动）。

同样地，左图显示的是没采用 MRO 的情况作为参考。RLF 总数更高了，因为用户还会移动穿过覆盖空洞，这会导致另外的 RLF 的出现。通常地，这种场景下的波动会略微更大，即统计更不稳定。如果采用不考虑乒乓效应的 MRO（中图），则几乎看不到任何改进。“过晚切换”问题换成了“过早切换”问题，并且乒乓效应也大量增加。右图考虑了乒乓效应，它则没有明显地变化。

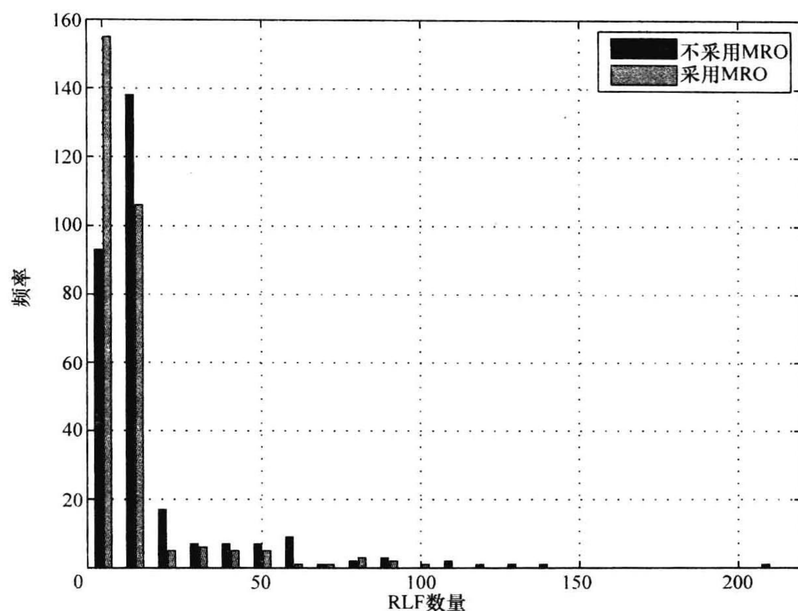


图5.20 在仿真的最后约450s中每个小区边界RLF数量直方图（如收敛的结果）

图5.21 移动性问题随时间推移的演进［900个用户以30km/h的速度在街上进行随机步行（没有优先的方向/切换位置)。无MRO（左图），简单的MRO（中图），考虑到乒乓效应的MRO（右图）］

如果和两个极端场景作比较，“所有用户都在少数街道上”和“所有用户都进行随机步行”，显示了当小区边界由所有用户普遍行为所支配时，MRO 会带来很大好处。如果用户可能在任何地方以任何角度跨过小区边界，MRO 的优势将会减小，合理的（对称的）默认值将会足以胜任（且不会被 MRO 所纠正）。

5.2　移动性负载均衡与流量控制

5.2.1　流量控制介绍

流量控制是指在网络中通过控制和引导方式将数据和语音业务建立在最合适的小区层与网络制式中的能力，它已成为 LTE 多层网络（如频率分层或宏蜂窝、微蜂窝、微微蜂窝分层）中的一项关键特性。流量控制能够通过有效利用网络资源池中的资源（如无线、传输、回传）以最优化网络容量与用户体验。流量控制也能够用于 GSM/EDGE、WCDMA/HSPA、WiFi 与 LTE 共存的网络中，如图 5.22 所示。流量控制能够减少 OPEX 并限制或推迟 CAPEX 开销。

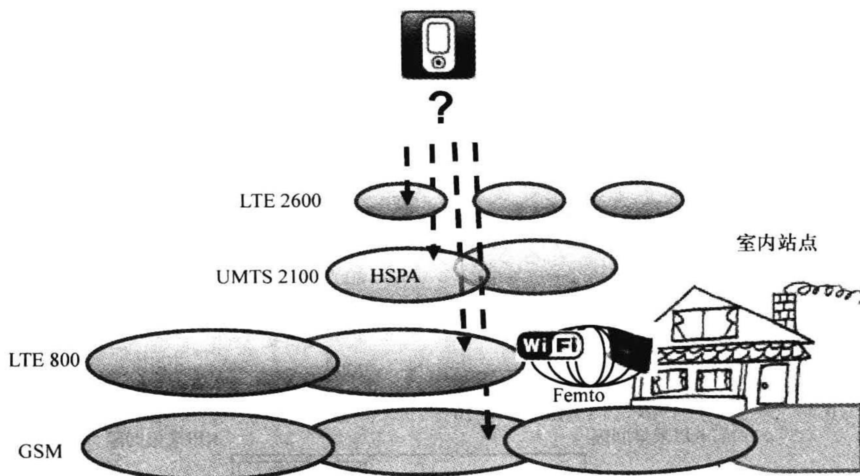


图 5.22　流量控制策略示例

流量控制面临的最大挑战是如何通过协调移动性配置参数将流量指向最佳网络层，但如 MRO 章节中所述，在切换、无线链路失败及乒乓效应等场景下流量控制不应损害健壮、优化的移动性能。这需要考虑：

1）UE 支持的能力（RAT、系统频带、载波频率）；

2）网络层支持的能力（发射功率、高级天线系统或波束赋形等特性）；

3）请求的业务、用户感知、QoS/QoE；

4）增强的 QoS 区分；

5）可用小区中的小区负载动态变化；

6）UE 与 BTS 的功耗；

7）UE 的速度与移动性。

基于网络部署情况，流量控制可能存在多种用例以优化：

1）在分层网络中均衡负载（称作 MLB）。移动性负载均衡的目的是在干扰和覆盖情况允许的前提下将业务从高负载小区移动到低负载邻区中。这样可以更好地利用小区容量并提高 UE 吞吐量。

2）将宏蜂窝中的负载分流至低功率小区、HeNB 或 WiFi：将宏蜂窝中的业务请求尽可能多转移至微小区中。可以采用覆盖扩展技术控制分流的程度。

3）避免快速移动 UE 连接至低功率小区：这一移动性控制的目的是避免快速移动 UE 反复切换。

4）最小化 eNB 功耗：将业务从处于功率节省模式中的小区中通过重定位转移出来，在业务负载低的情况下小区可以关闭发射机以节省功率。具体机制可参见5.3节。

以下章节重点关注 LTE 系统内以及 LTE 与 WCDMA/HSPA 之间的移动性负载均衡。首先从理论分析的角度概述移动性负载均衡的 SON 策略；然后在 5.2.4 节中讨论负载均衡的标准特征与流程；5.2.5 节介绍负载均衡的实例；5.2.6 节介绍上行链路方向需要考虑的一些问题；5.2.7 节总结 MRO 与 MLB 之间的互操作。

5.2.2 移动负载均衡的 SON 策略

移动性负载均衡的目的是通过控制包含 UE 测量门限在内的移动性参数与配置数据，在一定地理区域内的可用小区之间进行负载均衡。重叠覆盖的小区可属于相同或不同的频率层、网络层或 RAT。本节的以下部分中负载均衡与移动性负载均衡均指同一概念。

SON 策略包括以下3个主要阶段：

1）阶段Ⅰ：LTE 引入阶段。作为网络演进场景的一种典型情况，E－UTRAN 网络将叠加在现有的 2G/GERAN、WCDMA/HSPA 等无线覆盖之上。静态配置移动性参数或简单的 SON 策略可以自动地调整移动性配置以保证业务提供与基本的网络覆盖。也就是说，在有 LTE 覆盖的条件下将 LTE 终端接入 LTE 网络；在 LTE 覆盖或业务提供能力变差或没有 LTE 覆盖的时候，将 LTE 终端接入其他的 RAT。这种流量控制策略主要通过控制空闲模式下的移动性参数（如重选优先级与门限）来实现。空闲模式下的负载均衡机制将在 5.2.4 节进一步阐述。

2）阶段Ⅱ：LTE 成熟阶段/高 LTE 渗透率。在这一阶段自组织特性成为一项关键特性。为了实现 LTE 网络内或 LTE 与其他 RAT（如 3G/HSPA）之间的动态负载均衡，将有更多的 SON 高级策略可调整移动性参数与配置数据，可控制切换偏置、测量门限、重选优先级与门限等参数。读者可参看 5.2.4 节中的进一步阐述。当 LTE UE 的渗透率足够高（50%以上）的时候，LTE 小区/分层之间以及 LTE 与 3G/HSPA 之间的动态负载均衡可以提高资源利用率。

3）阶段Ⅲ：LTE 部署范围扩大，LTE UE 能力扩展，LTE 语音业务成熟阶段。LTE 频谱可能增加，导致有多个 LTE 频率分层。需要有增强的 MLB 机制在不同的频

段之间分配业务，同时考虑载波聚合等高级特性。

下面将深入讨论阶段Ⅱ的动态移动负载均衡机制。

负载均衡在2G或3G等现有网络中已有使用，但采用的是静态方式。传统方式是通过在配置移动性参数时考虑业务密度实现均衡效果，主要包括在网络规划阶段配置或在后续的运行阶段手工优化。在某些情况下可采用半静态机制，通过 OAM 系统优化移动性参数，减少人工介入。然而这些方法具有滞后特性，不能对业务动态变化做出反应。例如，在足球赛事等场景下，业务可能从地铁站流向赛场然后在一段时间后再反向流动。因此，与其他 SON 机制相比，负载均衡应能够动态做出反应。快速动态负载均衡要求或部分要求一种分布式架构，判决实体位于 eNB，以便获知业务改变、无线信道、当前用户满意度信息。

5.2.3　负载均衡的理论分析

本节将介绍两层网络的负载均衡分析模型。两层网络之间的负载均衡可以采用马尔科夫过程建模，如图5.23所示。此处关注的是两层网络负载均衡系统，但是这一模型是普遍的，可以扩展至任何多层网络。模型中，状态记为 $P_{x,y}$，x 与 y 是缓存中有数据的用户数目，分别接入层1与层2。λ_1 与 λ_2 是层1与层2中的新呼叫到达概率，服从泊松分布。当一个小区中的潜在用户数远大于活动用户数时，可假设新呼叫到达概率与本层内的活动用户数独立。μ_1、μ_2 分别是呼叫在层1和层2结束的概率。假设一层内的所有呼叫具有相同的平均长度，每层的可用容量被层内的所有用户平均共享。层1和层2的最大用户数为 N_1 和 N_2。

呼叫在具有 n 个用户的某一网络层中结束的概率取决于呼叫长度，即 callsize（比特单位）、小区吞吐量 C、用户数 n。小区吞吐量可以表示为

$$\mu = n \cdot \frac{C}{n \cdot \text{callsize}} = \frac{C}{\text{callsize}}$$

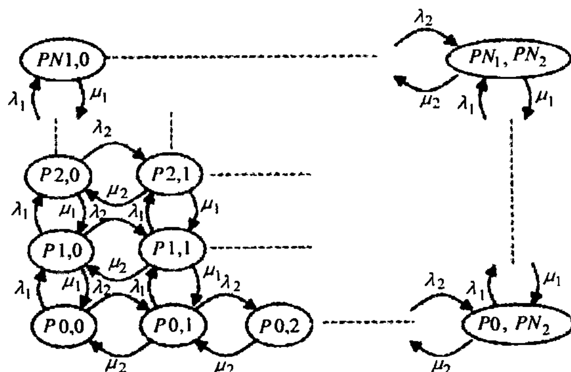


图5.23　马尔科夫过程描述两层负载均衡机制

假设呼叫长度与系统独立，不同层的小区容量可能不同。

假设每层存在一个 M/M/1/N 队列（泊松到达，指数服务时间，一个服务器，系

统中最多N个用户），状态概率Px，y（层1有x个用户且层2有y个用户的概率）可以计算为（Schwartz，1988）

$$Px,y = Px \cdot Py = \frac{(1-\rho_1)\rho_1^x}{1-\rho_1^{N_{HSPA}+1}} \cdot \frac{(1-\rho_2)\rho_2^y}{1-\rho_2^{N_{LTE}+1}}$$

式中 ρ_x——等于λ_x/μ_x，每层的平均用户吞吐量等于基于本层状态概率加权的每状态平均吞吐量（Jφrgensen等人，2011），因此层1吞吐量变为

$$TP_{UE} = \sum_{x=1}^{N_1}\sum_{y=0}^{N_2} P_{x,y} \cdot \frac{C_1}{x}$$

式中 C_1——层1的小区吞吐量。

注意到这一模型假设每层的容量是固定的，与系统内的用户数无关，也即该模型不考虑多用户分集增加的干扰。为了得到吞吐量的CDF分布，需要考虑小区内不同用户的比特率体验，也就是说，小区中心的用户比小区边缘用户能体验到更高的吞吐量。因此可以将用户获得吞吐量为k的概率定义为f（k），此处假设该用户为本层内的惟一用户。这个函数从统计意义上表示了位于小区不同位置的用户获得的不同比特率，其取决于小区中的调度方式。层1获得比特率m的概率可以近似为（Jφrgensen等人，2011）

$$P(UE_T P = m) = \sum_{x=1}^{N_1}\sum_{y=0}^{N_2} P_{x,y} \cdot f(xm)$$

理论分析模型可以用于评估简单负载均衡策略的性能，下面将通过实例说明。

考虑系统具有一个LTE层与一个HSPA层，只关注下行。考虑多种流量控制技术，见表5.4。基于上述理论分析模型可以得到大量的两层网络负载均衡性能评估结果。此处考虑的是半静态负载均衡机制，包括将用户随机指配到一种RAT的随机策略，以及邻区瞬态分布与UE无线环境完全已知并作为判决输入的流量控制策略。不失一般性地，假设负载均衡行为只在呼叫连接建立阶段考虑。

表5.4 流量定向算法示例

	描述/准则/结果	需要的信息	备注
随机算法（RA）	将UE随机分配到任意层（LTE或HSPA）	无需预知信息	
推入最佳层算法（PBLA）	每层分配预定数目的用户（基于每层的最优平均数）	每层的小区吞吐量	实现业务的平均最优分布以反映层间的容量差别
基于用户负载的算法（ULA）	目的：基于每层时变小区负载的动态负载均衡。 层选取准则：$\arg\min_{l\in L}\left(\frac{nUE_l}{C_l}\right)$，其中$l$是层标识，$nUE_l$是$l$层的活动用户数，$C_l$是$l$层的小区容量，$L$包含所有的小区层	每层的小区吞吐量 每层的瞬时小区负载（活动用户数）	半动态，每一UE在连接建立阶段被分配至具有最低瞬时负载的分层

（续）

	描述/准则/结果	需要的信息	备注
基于用户吞吐量的算法（UTA）	负载均衡准则： $TP_{u,l}=\frac{SINR2TP\ (SINR_{u,l})}{nUE_l+1}$ 其中 $TP_{u,l}$ 是用户 u 接入 l 层可达到的平均吞吐量； $SINR_{u,l}$ 是用户 u 在 l 层的 SINR，SINR2TP 是单用户场景下将 SINR 映射为用户吞吐量的函数。$TP_{u,l}$ 是用户 u 在层 l 中的平均吞吐量估计值	每层的小区吞吐量 每层的瞬时小区负载（活动用户数） 每层每用户的 SINR 预知每层的 SINR 到用户吞吐量映射曲线	吞吐量与负载完全已知

下面将评估 RA 与 PBLA 机制的性能：图 5.24 给出了通过理论分析与仿真得到的 RA 与 PBLA 的 5% 用户吞吐量性能与整个网络总负载的关系曲线。“HSDPA”与“LTE”曲线显示了使用 RA 机制的 HSDPA 层与 LTE 层的 5% 用户吞吐量性能。可以看到，与 RA 相比，采用 PBLA 机制后获得了明显增益。RA 性能受限的原因是当 50% 的用户被分配到各层后 HSDPA 层出现拥塞。除了理论分析结果外，本图也给出了通过蒙特卡洛仿真得到的结果。

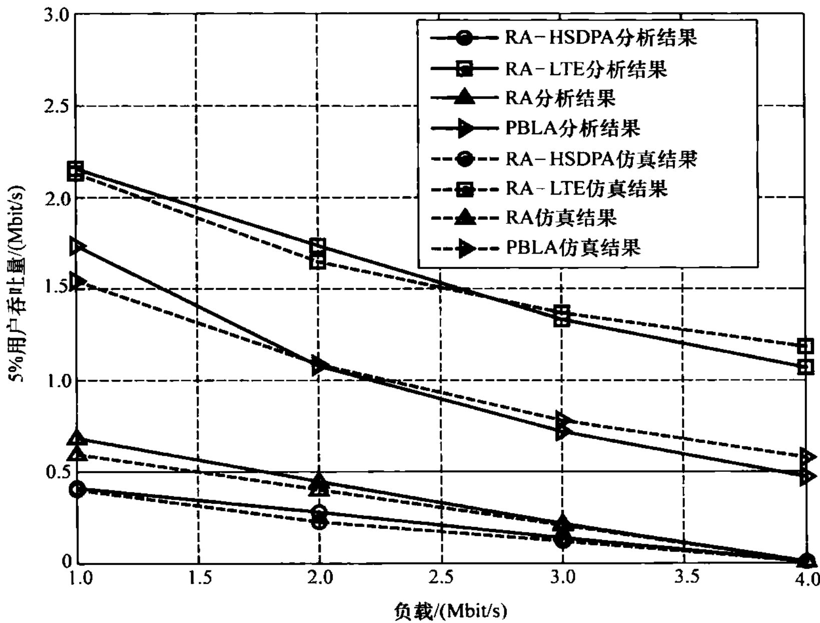


图 5.24　理论分析与仿真得到的 RA 与 PBLA 机制 5% 用户吞吐量与负载的关系曲线

类似地，图 5.25 显示了平均用户吞吐量与网络总负载之间的关系曲线。HSDPA 层与 LTE 层的 RA 性能平均等于 RA 的总体性能。曲线趋势与 5% 用户吞吐量相同。PBLA 较 RA 有明显的性能增益。理论分析结果与仿真结果基本一致。

基于上述分析可以得出结论：以上两种算法中 PBLA 具有最佳性能。

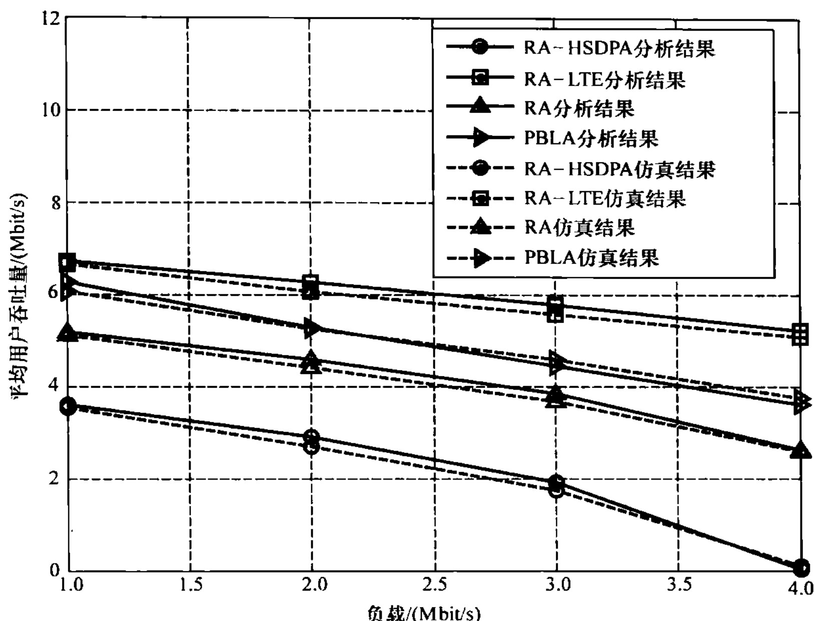


图 5.25 理论分析与仿真得到的平均用户吞吐量比较曲线

以下讨论 ULA、UTA 与 PBLA 的性能比较。图 5.26 显示了 5% 用户吞吐量与平均用户吞吐量与负载之间的曲线。PBLA 具有最差性能，以下用作参考基准。从 5% 用户吞吐量曲线可以看出，当负载等于 6Mbit/s 时，网络开始拥塞。当参考算法使小区

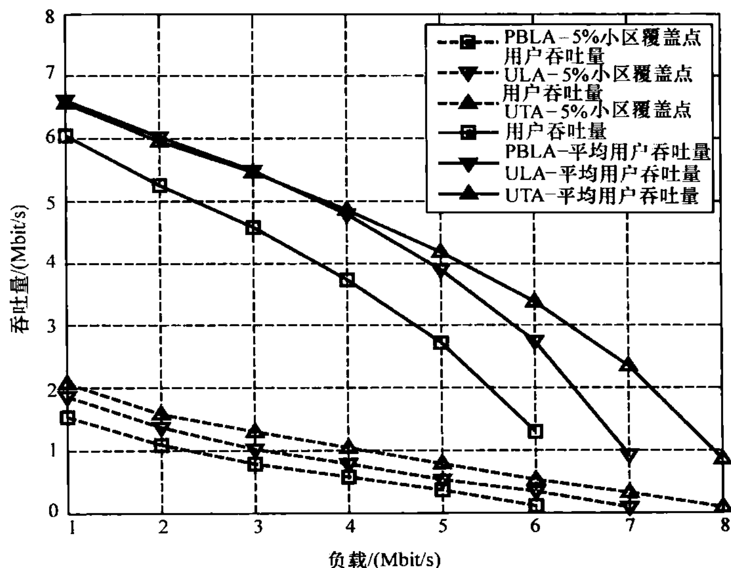


图 5.26 PBLA/ULA/UTA 算法的平均用户吞吐量与 5% 用户吞吐量性能

边缘用户吞吐量为零时，ULA 与 UTA 仍然能够提供明显大于零的吞吐量。当 5% 用户吞吐量取最小 0.5Mbit/s 时，ULA 与 UTA 分别提供了 20% 与 40% 的容量增益。

ULA 与 UTA 的平均吞吐量也具有很大增益。当负载在 4Mbit/s 以下时，ULA 与 UTA 具有相近的性能，由此可以得出在低负载的情况下考虑用户的 SINR 不能获得增益。对 4Mbit/s 以上的负载，UTA 显示出了最佳性能。在负载为 6Mbit/s 时，参考算法、ULA、UTA 的平均用户吞吐量分别为 1.3Mbit/s、2.7Mbit/s、3.4Mbit/s。相应地，ULA、UTA 的增益分别为 112% 、162% 。

取得较大增益的原因是参考算法没有使用任何瞬时信息，仅仅依赖网络层提供的容量。而 ULA 与 UTA 这两种高级算法则基于瞬时信息（如每层的瞬时负载）分配用户，因此能够适应系统的动态变化。UTA 获得的额外增益来源于使用了用户的瞬时 SINR 信息。用户 SINR 用于评估当前负载下用户在各层可获得的吞吐量。图 5.27 显示了 LTE 吞吐量与 HSDPA 吞吐量的比值随 SINR 变化的曲线。在低 SINR 的情况下，LTE 吞吐量比 HSDPA 吞吐量高 8 倍；在高 SINR 时，LTE 吞吐量仅比 HSDPA 吞吐量高约 1.5 倍。原因是 UTA 将具有低 SINR 的用户分配至 LTE 层，而将高 SINR 的用户分配至 HSDPA 层，从而最大化用户平均吞吐量。

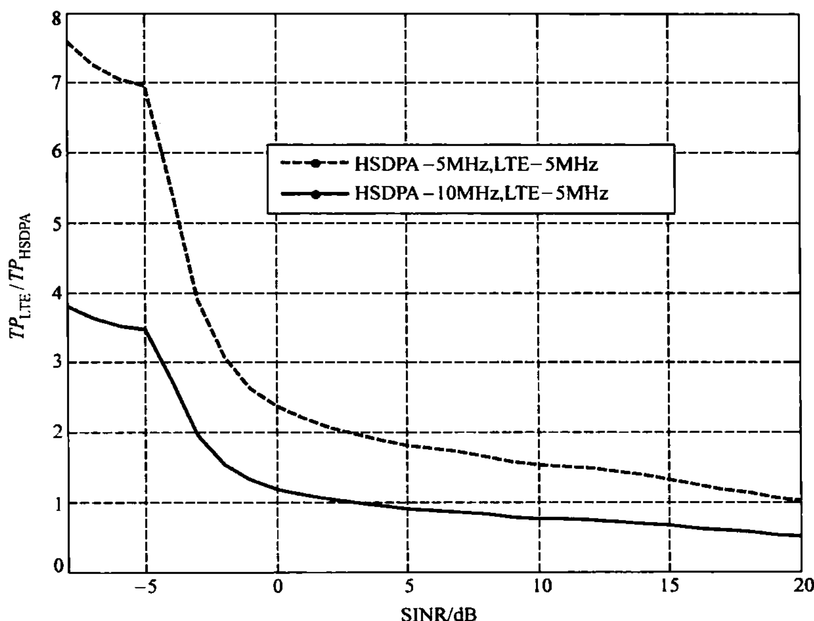


图 5.27　LTE 吞吐量映射较 HSDPA 吞吐量映射的增益

利用 UTA 获得的潜在增益依赖于 LTE 与 HSDPA 吞吐量之比。这一比值取决于系统频谱效率，系统使用的高级特性如 MIMO、用户接收机类型等。该比值越接近 1，UTA 较 ULA 的增益越小。

5.2.4 UE分配至特定网络层的标准流程

负载均衡可基于网络之间或网络与终端之间交互的标准信息，通过控制标准的移动性参数与配置数据（如切换偏置、重选优先级与门限、测量门限）实现。基于这些实现性特征，可以通过若干过程将用户分配至更加合适的层/小区。

一般，以下3GPP标准特征可以实现将特定用户或用户组分配至特定的RAT/层/小区，如图5.28与图5.29所示。连接模式下的负载均衡通过偏置或强制地调整切换参数影响切换过程。

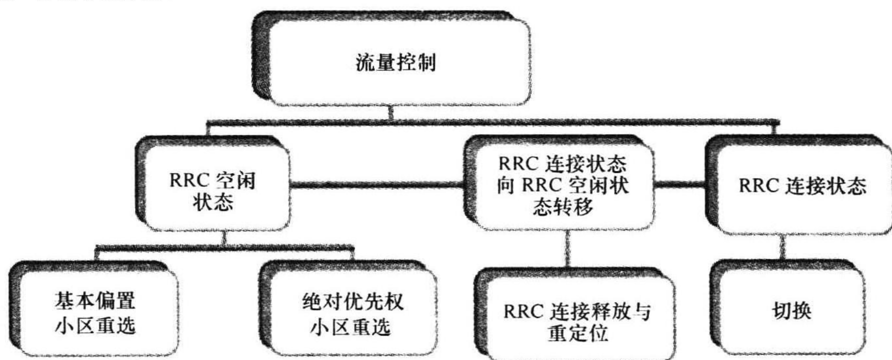


图5.28 LTE流量控制树形图

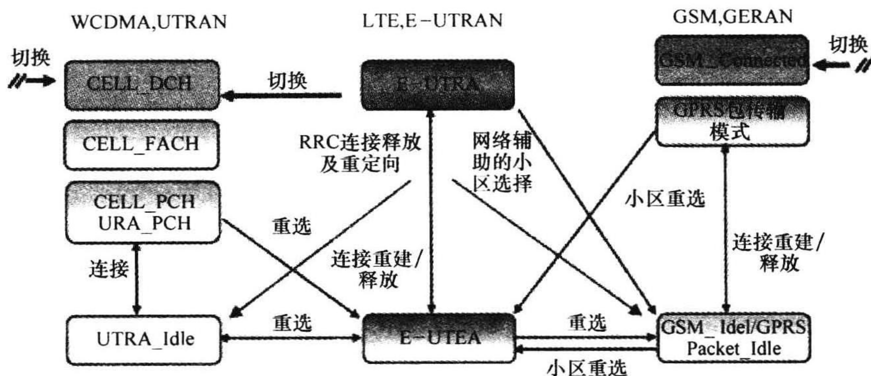


图5.29 LTE/WCDMA/UTRAN/UMTS/GSM网络间互操作的标准流程

1）通过重定位实现负载均衡：连接建立过程中拒绝接入或重定位；

2）空闲模式下的负载均衡：通过小区选择/重选偏置与优先级影响空闲模式驻留。

1. 关于连接模式下的负载均衡

因呼叫或数据传输到达而引起空闲状态向激活状态迁移时，UE在当前驻留的小区将建立一条连接。由于UE自主执行驻留与小区重选过程，因此可能出现当前小区没有足够的资源处理所期望的业务，不能满足QoS。这可能是由错误的驻留判决、用户业务需求改变或无线环境发生变化所导致的。在这种情况下，UE可能会被丢弃或

通过调整小区特定偏置或强制切换等切换参数将其分配至其他小区或网络层，这会导致信令增加以及呼叫建立时间延长。这些方式在3GPP中已有很多研究，使用切换参数进行负载均衡的方法将在相关章节详细阐述。

2. 关于重定位实现负载均衡

会话建立阶段触发呼叫重定位可能基于：

1）过载情况下的负载均衡；

2）当前网络中给定业务不可用。

与连接建立后的强制切换相比，会话建立阶段使用流量控制的原因是为了降低信令负荷。与WCDMA不同，LTE不支持RRC Connection Reject消息（见图5.30）重定位至另一频率或RAT（GSM或E-UTRA，3GPP TS25.331，2011）。在WCDMA里，重定位的频率或RAT信息包含在RRC Connection Reject消息的frequency info、inter-RAT info信元中。接收到这一消息后，UE重选至目标频率或RAT，并在wait time信元时间内禁止重选至原频率/RAT。连接建立将在新的频率或RAT上重新开始。

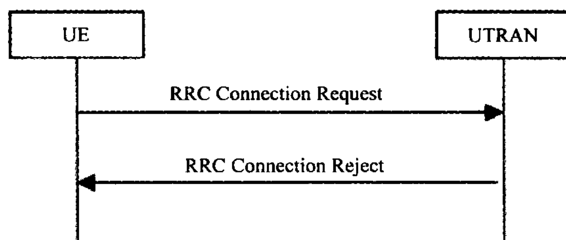


图5.30 RRC连接建立、网络拒绝RRC连接并重定位

E-UTRAN网络中不能在会话建立阶段将UE分配至其他频率或RAT。但是在LTE中，连接一旦释放，就会通过RRC Connection Release消息给UE发送专用重定位信息（3GPP TS36.304，2011）。

3. 关于空闲模式下的负载均衡

空闲模式下的负载均衡旨在保持空闲UE驻留在最佳小区，这样当UE变为激活模式时能更好地获得所请求的业务。为使网络能最优地提供UE所请求的业务，应在空闲模式下控制UE合理分布于可用的网络小区中。这一方法的好处是可以优化连接建立次数并减少网络信令开销。为了能将给定UE分配至能更好地提供所请求业务的小区，网络可以智能地预测用户的业务使用情况，如通过收集用户历史属性、偏好等。

一般，当UE第一次开机时会启动小区选择过程。它扫描所有无线信道以寻找最适合驻留的小区，扫描的RAT列表由非接入层（Non Access Stratum，NAS）定义，如通过指示与所选PLMN相关的RAT。限制RAT数目可以加速选择过程，或倾向于UE偏好的某一RAT。小区重选过程如下：一般只要满足最小的无线条件，用户设备（UE）在空闲模式下会驻留在某一小区（3GPP TS36.133，2011）。这里的驻留过程是指同步到小区并侦听广播信道（BCCH）。一旦驻留小区的无线信道条件衰落到预定义门限以下，UE开始重新选择一个更适合驻留的小区。当找到一个更好的驻留小区

时，UE 同步到新的小区（使用小区重选机制）并开始驻留在上面。

然而，UE 自发进行小区重选，因此网络只能通过调整小区特定参数（如重选偏置、门限、优先级）来控制 UE 的判决。如何设置与优化这些参数以及这一方法、如何执行都将在下面介绍。控制驻留决定这一标准特征将在 5.2.4.5 节中介绍。

原则上，可以用上述标准机制的任意组合来分配业务。然而如上所述，由于空闲模式流量控制对于网络侧和 UE 侧的作用相当理想因而偏向于采用这种方式。在 LTE 部署更为成熟的阶段，这一方式不够用时，空闲模式流量控制将与重定向及/或负载切换的方法同时使用。具体的组合方式将取决于部署场景、终端支持、业务类型等因素。对于不能容忍大时延的业务，如流媒体，不能采用基于重定向的流量控制方案以避免延长初始缓冲时间。各负载均衡机制在以下方面是不同的，在选取负载均衡策略时应仔细评估：

1）时延，如呼叫建立阶段增加的时延；

2）用户面中断，如由于切换的执行；

3）控制面开销；

4）UE 功耗；

5）移动性与 QoS/吞吐量性能。

现有大部分的研究与 3GPP 讨论关注的是连接模式下的负载均衡，原因是连接状态下 eNB 能完全控制 UE。到目前为止，3GPP 还没有描述空闲模式负载均衡与通过重定位的负载均衡，但这些方式可以通过标准特征实现。因此，下面将具体阐述这三种负载均衡机制。

基于 SON 的负载均衡策略可以调整上述特征的参数以及 UE 测量门限。某一节点的自动调整可以基于该节点的负载状况及需求、小区间交互的小区负载、切换配置等信息。因此，下面将进一步详细讨论：上述特征可以基于哪些 UE 测量、标准里可用什么样的小区负载定义、切换协商时网络间交互移动性信息的其他标准可能性以及如何用于负载均衡。连接模式与空闲模式下的负载均衡流程也会在下面介绍。

5.2.4.1 负载均衡相关的 UE 测量

上述大多数流程都要求终端进行信道质量与/或信号强度测量，终端基于这些测量自发完成驻留判决或辅助网络完成切换判决。对后者，可以配置或触发终端向网络报告测量结果。两种标准的 UE 测量量与负载均衡相关，UE 信号强度与信道质量，即 LTE 小区的 RSRP 与 RSRQ。图 5.31 显示了这两种测量量与 SINR 的关系。异系统邻区可以定义相似的测量量，如 3G 系统的 RSCP、Ec/No、RSSI。UE 测量在 5.1.3 节中已有简要描述。终端在网络提供的载频列表里根据给定的测量配置自发搜索小区。网络可以向 UE 提供一个黑名单，包含有不允许 UE 测量的载频。激活模式下的测量常在同频邻区进行，异频与异系统测量要求有传输空隙。空闲模式下，测量的数量可以由与驻留小区相关的绝对门限（Sintrasearch/Sintersearch）控制，也就是说只要驻留在满足给定门限的小区，终端可以避免测量其他小区，这样可以减少耗电。

5.2.4.2 负载均衡中的负载信息交互

可靠、快速、每分钟量级的邻区负载信息交互有助于跟踪网络中的负载变化，如

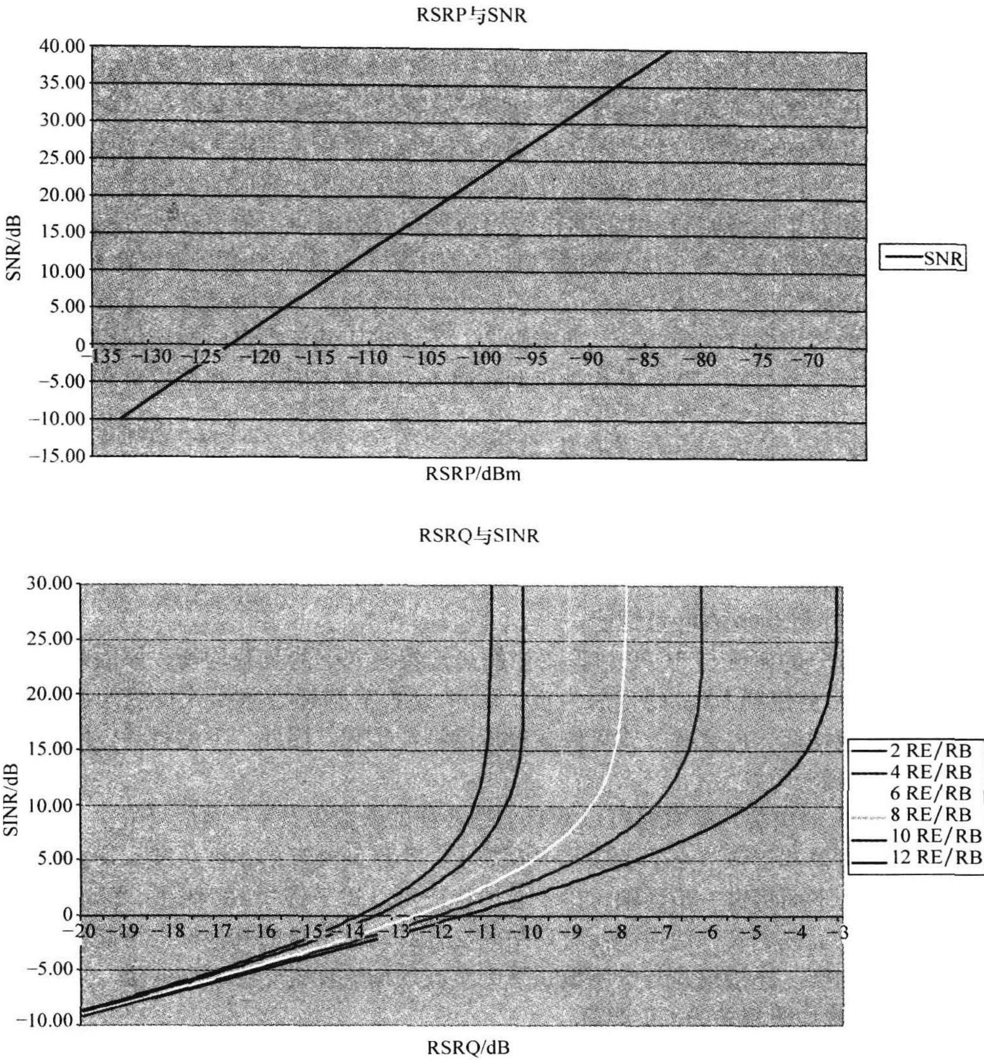


图 5.31　标准的 UE 测量量 RSRP/RSRQ

有助于识别最有可能接纳多余负载的小区。在这种情况下，从过载小区中发出的切换请求可以分配至最有可能满足请求的小区中。否则，如果没有这些负载信息，则严重过载小区可能盲目发起切换至任意邻区。切换请求被拒绝的可能性显然会很高，这将导致不必要的网络负载、不必要的流量控制时延，以及次优的负载均衡判决。

R8 中，eNB 可以使用 Resource Status Update（资源状态更新）流程通过 X2 接口交互负载信息。然而，仅仅为保证比特率（GBR）和非保证比特率（non - GBR）业务分别指定了物理资源块（PRB）的使用率，上行链路和下行链路也是这样。对于一个小区可以接纳多少负载的表示并不是很清晰。图 5.32 显示了两个例子。

1）小区中仅有一个运行后台下载的在线用户。该用户可能获得 100% 的资源，

non－GBR 业务的 PRB 利用率将会是 100% ，GBR 业务的利用率为 0%。邻区不清楚有多少 PRB 可以用于负载均衡的评估，这取决于用户优先级。对于金牌用户，服务小区可能不愿意显著压缩该用户的资源指配（导致减少吞吐量）；如果是铜牌用户，则可以压缩。GBR 与 non－GBR 业务的区别太过粗糙。

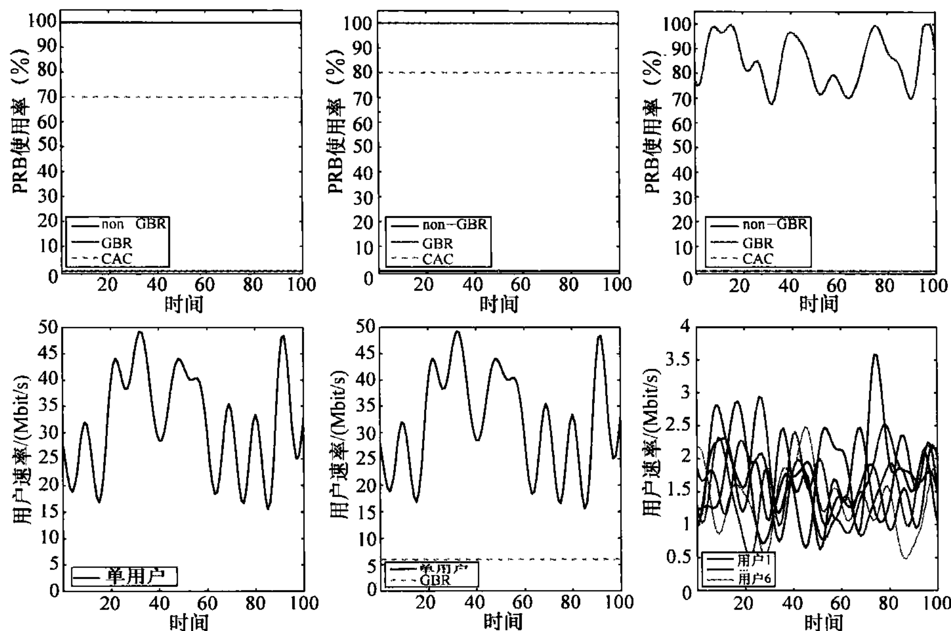


图 5.32 负载信息示例：有 GBR 的单一尽力而为用户（左图）、无 GBR 的单一尽力而为用户（中图）、若干个具有可变比特率流的用户（右图）的 PRB 使用率与综合可用容量（CAC）

2）如果上例中的下载用户具有保证比特率（如 6Mbit/s），服务小区可能标识为 100% GBR 业务与 0% non－GBR 业务。也即尽管该小区实际上负载很低，但看上去似乎已经拥塞。

3）假设一个小区有若干个具有可变比特率流业务的金牌用户，平均占用了 80% 的 PRB，即该小区标识为 80% GBR 业务。然而，为了保护现有业务，该小区可能不愿意再接纳任何业务。

上述例子表明需要有新的用于负载均衡的特定信息。每个小区都完全知晓其自身的业务，包括 QoS 属性与无线条件，因此小区应在负载信息中包含所有这些信息而不是仅仅报告纯 PRB 使用率。

R9 引入了一种简单有效的解决上述问题的方案，在现有的资源状态更新流程中增加了新的负载信息即综合可用容量（CAC）。3GPP 中定义“小区可以依据所指示的可用容量接纳业务”（3GPP，TS36.300，2011），没有定义具体的计算 CAC 的方法。换言之，小区通过一个值通知邻区其可以接纳多少负载。这可能包含小区面临的任何限制，如传输负载、控制信道、基带容量，特别是 QoS。回顾上述两个例子及图 5.32，CAC 可以按如下方式指示：

1）服务小区考虑在线用户的优先级，确定金牌用户应得到不低于30%的资源。因此它将向邻区指示有70%的可用容量。

2）服务小区估算 GBR 用户需要多少资源（含冗余），如需要20%（100%的PRB使用率可以达到30Mbit/s的速率，因此20%可以达到6Mbit/s的GBR业务），则指示为80%。

3）在这种情况下，服务小区为了保护流用户将指示0%的可用容量。邻区获知该小区将不再接纳负载均衡切换请求。

理论上，一个小区可以始终指示为0%的可用容量。但是任何小区都是运营商网络的一部分，应当相互协同。即使它运行在自私模式下，也可以通过接纳负载均衡业务来提高 KPI（如更大的吞吐量、更多的满意用户等）。

R9 指定了异系统 CAC，LTE 小区可以使用 RIM 流程向异系统（GERAN 与 UMTS）小区指示 CAC。R10 目前正在讨论 GERAN 与 UMTS 小区是否需要生成 CAC，作为 GERAN/UMTS 小区向 LTE 小区提供的负载信息的一部分。5.2.5.2 节中将具体讨论异系统负载均衡。

5.2.4.3 移动性切换参数协商过程

移动性参数改变流程用于保证被分流至邻区的用户不会被切换回原小区。LTE 目前只对 LTE 系统内邻区定义了这一流程。异系统场景下这种后向切换的可能性很小，因此不需要这种机制。前面的章节表明过载小区知道哪一邻区可以接纳多少负载。图5.33中的左图表示过载小区（黑色 eNB，黑色 UE）具有一个未过载邻区（灰色 eNB，灰色 UE）的场景。黑色 UE 将在黑线处发生切换，灰色 UE 在灰线处切换。两条线之间的区域一般称作迟滞区域，该区域内用户可以连接至任一小区。迟滞区域是切换区域的一部分，迟滞区域的边界处可发起切换。离灰色 UE 最近的两个黑色 UE 是负载均衡切换的候选对象，所有其他黑色 UE 假定在迟滞区域之外，因此不能连接至灰色小区。右图中这两个候选对象被切换至灰色小区。

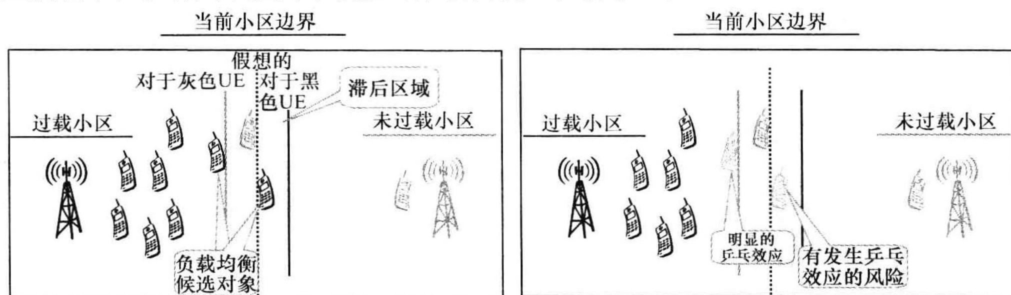


图5.33 过载小区（黑色）与未过载邻区（灰色）（左图：仅无线切换；右图：强制切向未过载邻区）

可以看到一个有趣的现象：一个候选对象在迟滞区域内，一方面，UE 将连接至更好的小区（灰色）以获得更好的 SINR；另一方面，该 UE 比普通切换（黑线处执行的切换）具有更低的乒乓保护，因此该 UE 发生乒乓切换的风险很高。这种现象对于另一个候选对象更加明显，在当前切换参数设置与无线条件下，灰色小区明显会把

该用户切换回去。

R9引入了一种在小区间协商新的切换参数的机制，即适当地移动小区边界。如图5.34所示，在移动性参数改变流程中，黑色小区可以经X2接口发送移动普通小区边界的请求。如MRO章节所述，切换判决算法是厂家特定的，因此交互的是变量值而非绝对值。移动小区边界的另一个好处是未来基于无线原因的切换将在新的小区边界执行。只要业务情况相似，将不再需要进一步的负载均衡行为。

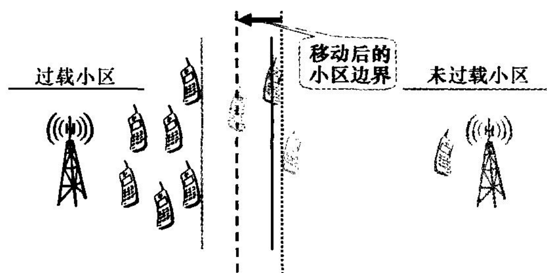


图5.34 强制切换及随后的小区边界移动

5.2.4.4 连接模式下的负载均衡机制

原则上，连接模式下的负载均衡可以简单地通过强制切换实现，即将用户从高负载小区切换至低负载邻区或依据负载自动调整切换参数（如小区/频率特定偏置），使得切换自动偏向于低负载小区。在异频场景，过载小区与分流目标小区使用不同的频率，不存在相互干扰问题。然而，在同频情形，无线条件将限制某一频点上两小区间负载均衡可行的区域。图5.35重复图5.2，其中黑色区域代表用户可以连接至多个小区的位置。只有这些区域中的用户可以作为负载均衡切换的候选对象。此外，强制切换一般会导致SINR衰减，因为最强小区变为了干扰。SINR损失需要获得补偿，即对于相同的QoS，用户将在目标小区中产生更多的负载。评估同频负载均衡增益的时候，需要考虑这一负载增加。

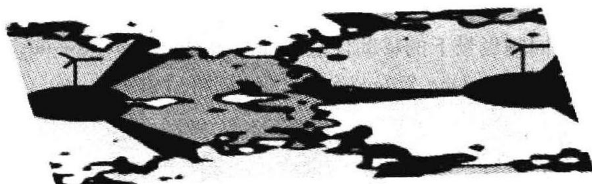


图5.35 两个eNB的场景（每个eNB服务3个扇区；黑色区域指示用户可以连接任一小区的位置，即该区域中的用户是负载均衡的候选对象）

下面分别对同频、异频及异系统间用户在连接状态下的负载均衡流程进行说明。

1. 同频负载均衡流程

本节讨论同频负载均衡如何实施。图5.36表示了该机制的消息序列图。同时，图5.37给出了一个潜在的场景，其中小区A过载、邻区B过载、邻区C未过载。小区A监测到过载，即用户对服务不满意。典型原因是所有的PRB已经被占用，然而也可能有其他原因，如控制信道或传输网络受限。

该小区将通过X2接口向邻区请求资源状态更新，并收集CAC值，从中选择哪些

eNB 1
eNB 2
监测到过载
资源状态请求
资源状态响应
资源状态更新
负载报告
寻找负载均衡的小区/UE候选对象
切换流程（原因：负载均衡）
负载均衡行为
移动性改变请求（原因：负载均衡）
移动性改变失败（允许的范围）
移动性改变请求（原因：负载均衡）
移动性改变应答
切换设置改变
切换设置改变
修正移动性配置

图 5.36　同频场景下的移动性改变流程（Holma 和 Toskala，2011，经 John Wiley&Sons，Ltd 许可后引用）

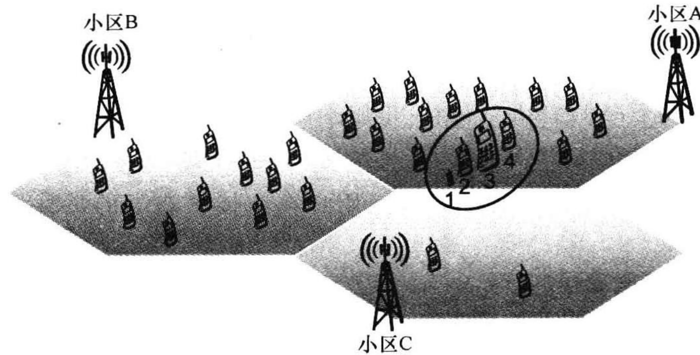


图 5.37　单一频率层内的小区 A 与小区 C 间移动负载均衡的示例场景

小区可以接纳业务。小区 B 也严重过载，因此小区 C 是惟一的候选对象。接下来该小区将从其服务范围内的 UE 中选择具有如下属性的合适的候选对象：

1）UE距离具有空余容量（即CAC>0）的邻区足够近。如果合理配置测量报告，则UE将向服务小区上报邻区的RSRP/RSRQ，因此服务小区可以确定每个UE的邻近小区。图中，圈中的是候选UE，其他UE不属于候选对象。

2）UE能在邻区获得更好的服务。服务小区可以从RSRP/RSRQ测量中估计出UE在相应目标中的SINR衰减。结合UE的QoS属性，小区可以估计出在目标小区中所请求的负载。图中，UE编号表示其QoS需求。UE #1和#2有好的机会，UE #4可能经受过高的SINR衰减，UE #3可能经受较小的SINR衰减，但高QoS将产生较高的负载。

3）UE将显著分流小区业务。尽管低速率UE（如语音）可能更适合于邻区，但它不能显著地分流业务。因此，分流UE #1或UE #4将产生很小的分流，UE #2和#3（如果可能）是更好的选择。

候选对象将向相应的目标发送切换请求，目标小区仍有可能拒绝该请求。但是，如果负载估计合理，这一概率应当很低。

最后，通过X2接口移动性参数改变流程，两个小区间协商新的小区边界以避免乒乓效应。这一过程可以发生在切换前、中、后（或根本不发生），这是厂商特定的。

2. 异频与异系统负载均衡流程

前面讨论了同频场景下的所有总体流程，大部分也适用于异频与异系统场景。综合可用容量在同频场景下通过X2接口指示，异系统场景下通过RIM流程指定，但仅支持LTE向2G或3G指示。目前2G或3G只可用实际的无线负载而非MLB特定的综合可用容量。异频负载均衡最显著的不同是在选择负载均衡的UE候选对象时有更大的自由度。图5.38显示了与图5.37相似的情形，不同之处在于有另一个共址的低负载频率层。只要有相同的覆盖，所有用户可以切换至另一个频率层。



图5.38 两个具有宏覆盖的不同频率层/RAT之间的MLB示例场景
（所有用户都是MLB候选对象）

图5.39给出了另一个例子。之前的场景假定的是网络的宏覆盖层，如800MHz网络。在某些区域中，存在容量层，如2.6GHz。从容量层的角度看，所有用户都是

负载均衡的候选对象。从宏覆盖层的角度看，只有容量层中的用户是候选对象。



图 5.39　两个不同频率层/RAT 之间的 MLB 示例场景（其中一层小区覆盖范围较小。在小覆盖范围小区内的所有用户是 MLB 候选对象）

相对于同频情形，异频或异系统 RSRP/RSRQ 测量不可用。异频或异系统测量要求有测量间隙，因此能更经济地使用。异频与异系统负载均衡的要素之一是合适的 UE 测量配置。另外，从信令开销的角度看，异系统切换代价更高，因此在触发时应仔细考虑。

过载小区能从异频/异系统 RSRP/RSRQ 测量可用的 UE 中选出一个子集，该子集更适应于异频/异系统邻区，从而得到显著的分流。可以使用与同频负载均衡相似的流程，但如前所述，将找到很多候选对象。

在 MRO 章节中已经讨论过，异频切换一般由 A5 事件触发（或者是类似的厂家特定的事件）。也就是说，如果服务小区低于某一门限而异频邻区高于另一门限，即触发切换。因此，异频负载均衡的乒乓风险相对较小。更具体的，只要目标小区不太差（可以从测量中读取）就不会发生乒乓。如果类似 A3 的条件用于异频切换，则一般使用较大的迟滞。因此，对于异频负载均衡，通过移动性改变流程进行新的切换参数协商看似没那么重要。尽管该流程仍可用，但在不使用此流程的情况下也能获得合适的负载均衡。异系统间未指定移动性参数改变流程。

5.2.4.5　空闲模式下的负载均衡机制

连接模式下，网络能完全控制 UE 并能获得全部信息，因此该模式下的负载均衡可以有效解决不均衡的负载状况。但是，它可能导致 UE 性能恶化，因为在网络侧中断数据传输并增加信令开销。因此，如果在空闲模式下应用负载均衡以平衡驻留 UE 的分布，则可以获得增益。

空闲模式 UE 分布可以遵循如下原则：

1）在 LTE 发展阶段，应当优先驻留在 LTE 上（由于 LTE UE 渗透率低）；

2）UE 应驻留在能最有效提供所请求业务的频率/RAT 上；

3）不同频率/RAT 之间的空闲 UE 应该分布在激活状态下负载较轻的频率/RAT 上。

由于小区重选过程是UE自发执行的，为了实现空闲模式负载均衡，网络不得不间接影响这一过程。为实现这一目的，目前有两种标准化方法：

1）基本偏置（BB）——调整小区对偏置，有效扩展或缩小小区可被终端选择的范围；

2）绝对优先级（AP）——调整小区优先级，增加或减小小区被选择驻留的概率。

图5.40讨论了这两种方法的基本属性。图5.41简单说明了这些方法。

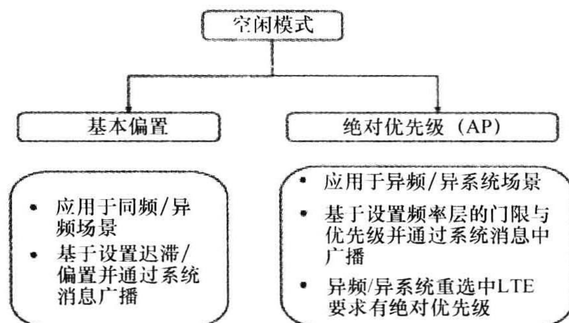


图5.40 空闲模式流量控制方法

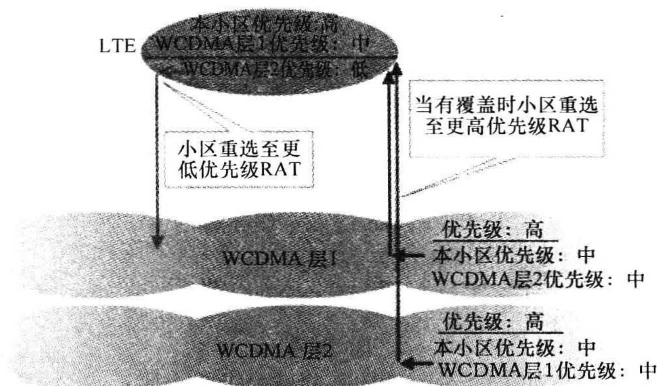


图5.41 LTE与HSPA之间通过绝对优先级或基本偏置方法实现流量控制

基本偏置方法是小区重选的主要方法，应用于同频重选中。该方法也可用于具有相同优先级的不同频率之间的小区重选（同系统内）（3GPP TS36.304）。

绝对优先级方法允许在重选过程中对给定频率或RAT划分优先级，仅在异频或异系统小区重选中可用。

因为每种方法都有其自身的局限性，应用在不同的场景中，有效的空闲模式流量控制方案应包含这两种方法。以下强调了这两种方法的特点：

1. 基本偏置（BB）

基本偏置基于标准的小区选择/重选过程，如图5.42所示。

为了确定测量小区（GPP TS36.133，2011）是否适合驻留，可使用小区选择准

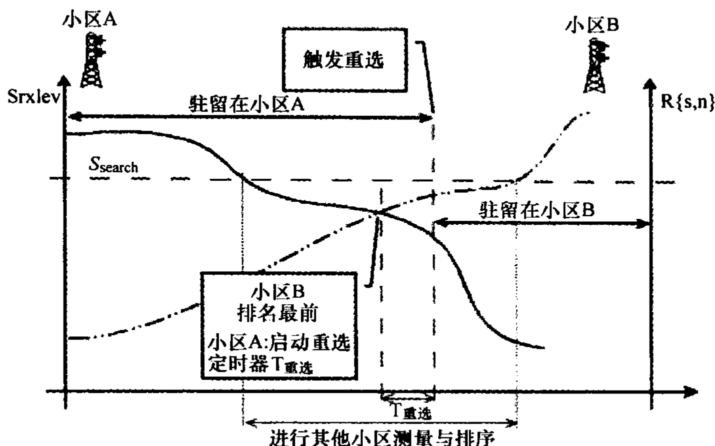


图 5.42　基本小区选择/重选

则，即 S 准则，当如下条件满足时满足该准则：

Srxlev > 0 和 Squal > 0

式中　Srxlev——基于测量小区的接收信号强度（E-UTRAN 中为 RSRP，UMTS 中为 RSCP）计算；

Squal——基于测量小区质量等级（E-UTRAN 中为 RSRQ，UMTS 中为 Ec/No）计算（3GPP TS36.304）。

如果多个小区满足 S 准则，则进行小区排序。排序算法根据以下公式对服务小区计算 Rs，对邻区计算 Rn：

Rs = Qmeas，s + Qhyst

Rn = Qmeas，n - Qoffsets，n

式中　Qmeas——测量小区的接收信号强度；

Qhyst——服务/驻留小区迟滞；

Qoffsets，n——两小区（s，n）之间的偏置。

小区排序算法根据如下公式选择具有最高等级的小区：

Selected cell = max {Rs，Rn}

小区排序所使用的测量值可以是信号强度或信号质量，由网络系统消息定义。

当驻留小区信号电平低于预设门限（S_{search}）时，UE 将根据小区重选准则搜索一个更合适的小区作为重选候选对象（3GPP TS36.304）。UE 不间断地对所有满足 S 准则的小区进行排序，且当满足如下条件时，重选至最好小区：

1）新小区的排序高于服务小区 $T_{reselection}$指定的时长。

2）UE 驻留到当前服务小区的时间超过 1s。

修改排序公式中的 Qoffsets，n 值使小区重选可以偏向于某一小区（如低负载小区），这样可以控制空闲用户的分布。Qoffsets，n 值可以在每个小区的系统消息中广播或对每个邻区单独设置。但是，这一偏置的使用有一定限制，因为同频网络配置下，过高的偏置可能会因干扰导致无线链路失败。

2. 绝对优先级

E－UTRAN 支持基于优先级的异频与异系统小区重选过程（3GPP TS36.304，3GPP TS35.304，2011）。GERAN 与 UMTS 从 R8 后支持。不同频率或异系统的绝对优先级可以通过系统消息、RRC Connection Release 消息或另一个 RAT 提供给 UE。专用信令（RRC Connection Release 消息）中的优先级可以取代系统消息中的优先级，并且在 UE 重新进入连接模式或有效定时器超时（可选）之前一直有效。

如果目标小区满足 $Squal > Thresh_{x,highQ}$ 准则，则 UE 重选至具有更高优先级的频率或 RAT，如图 5.43 所示。

在 $T_{reselectionRAT}$ 时间间隔内，如果服务小区满足 $Squal < Thresh_{serving,lowQ}$，则目标小区满足 $Squal > Thresh_{x,lowQ}$，UE 将重选至低优先级小区，如图 5.43 所示。质量门限 $Thresh_{x,lowQ}$、$Thresh_{serving,lowQ}$ 在系统消息中广播（3GPP TS36.331，2011）。如果系统消息中不包含这些质量门限，则在上述准则中使用 Srxlev、$Thresh_{x,highQ}$、$Thresh_{serving,lowP}$ 和 $Thresh_{x,lowP}$。

如果具有不同优先级的多个小区满足重选准则，则优先重选至高优先级的频率/RAT。如果具有相同优先级的多个小区满足重选准则，则采用与基本偏置方法类似的排序算法对小区排序。

图 5.43 给出了基于优先级的小区重选示例，其中 E－UTRAN 小区优先级高于 UMTS 小区。

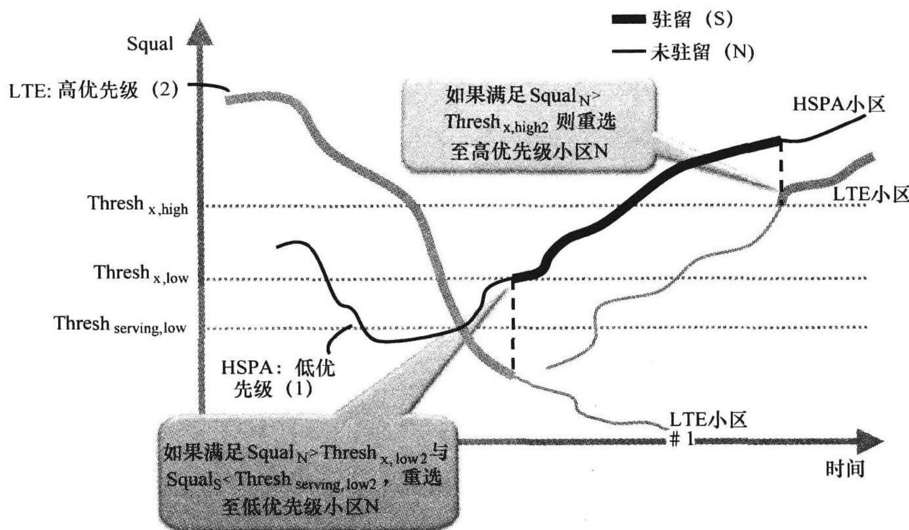


图 5.43 空闲模式异频/异系统重选算法

基于呼叫历史或移动性对未来 UE 业务的预测可用于单个 UE 优先级的调整。此处主要指连接释放时通过 RRC Connection Release 消息传给 UE 的专用优先级与门限，以及有效定时器。

5.2.4.6 空闲模式与连接模式负载均衡流程的协同

由于无线原因，分流至邻区的用户可能立即切换回原小区而导致乒乓切换。与此

类似，避免空闲连接模式的乒乓效应也很重要。空闲连接模式乒乓效应是指连接模式下的用户切换至某一特定小区或网络层时立即重选到另一小区或网络层而回到空闲模式，反之亦然。

因此，空闲模式下的移动性参数调整应与连接模式下的移动性参数调整需要进行协同。例如，如果连接模式下应用了小区或频率特定的切换偏置，则相似的偏置也应当用于重选判决。

5.2.5　MLB 结果举例

本节将介绍一些负载均衡的数值结果，包括 LTE 同频场景下通过切换参数调整实现的负载均衡；LTE - WCDMA/HSPA 异系统场景下通过呼叫建立时的重定位或基于优先级的重选实现的负载均衡。

5.2.5.1　LTE 同频场景下应用 MLB

在给出数值结果之前先展示同频仿真的一个截图，如图 5.44 所示。每个 UE 使用 300kbit/s 的固定比特率业务，即 YouTube 视频。浅灰色网格表示每个小区的负载，“1”上面的数字表示过载程度，黑色网格表示不满意用户数，即没有得到 300kbit/s 速率的用户数。左图显示了负载均衡开关开启前的情形。用户集中在中间位置，导致邻区过载，周围小区负载很低可以接纳业务。右图显示了负载均衡开关打开的情形，箭头指示由于无线条件发生切换的用户。与预期一样，只有靠近低负载邻区的用户受到影响。明显地，在过载小区中的用户靠近低负载邻区边缘这一特殊情形下，可以获得很大的增益。本例中，黄色小区可以分流足够多的业务使负载低于 100%，并使所有用户都满意。

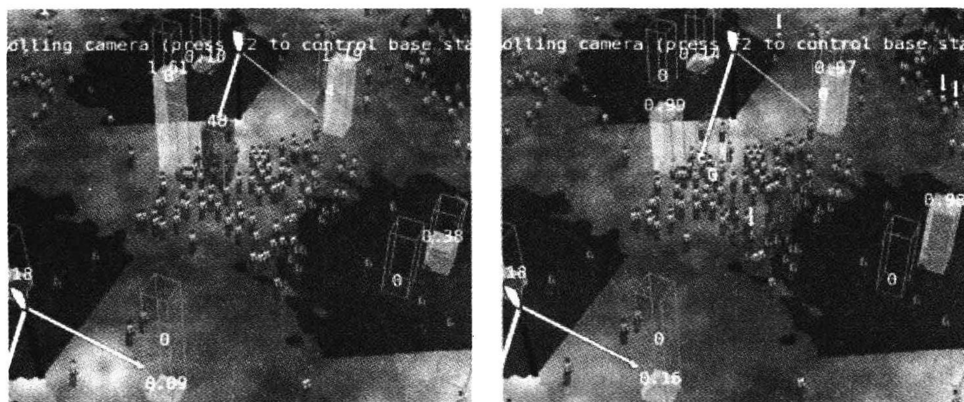


图 5.44　同频移动负载均衡

为了定量评估负载均衡增益，假设与 MRO 章节中相同的网络拓扑，小区大小为 500m 和 1732m（Turkka 和 Lobinger，2010），使用 wrap around 消除网络边缘的影响。所有用户使用固定比特率业务。CBR 业务的好处是可以清晰定义用户是否满意，如果得不到请求速率则用户不满意。特别地，CBR 业务可以创建 0 ~ 100% 的小区负载（就无线资源方面）。相比之下，全缓存或有限缓存模型一般创建 0%（如果没有用户

取得服务）或100%（1个用户占用了小区）的负载。CBR的这些特性简化了负载均衡的评估。

每个小区有5个移动用户生成后台负载，40个用户组成的热点在六边形限定的区域内移动，六边形直径为333m。这样，除了2.5Mbit/s的后台负载需求，热点需要的容量是20Mbit/s。考虑10MHz LTE下行链路具有10~12 Mbit/s的CBR容量。热点按图5.45所示的轨迹在网络中移动，每小时热点的位置用包含时间戳的边界六边形表示。用户与热点的移动速度为3km/h，因此总速度不超过6km/h。

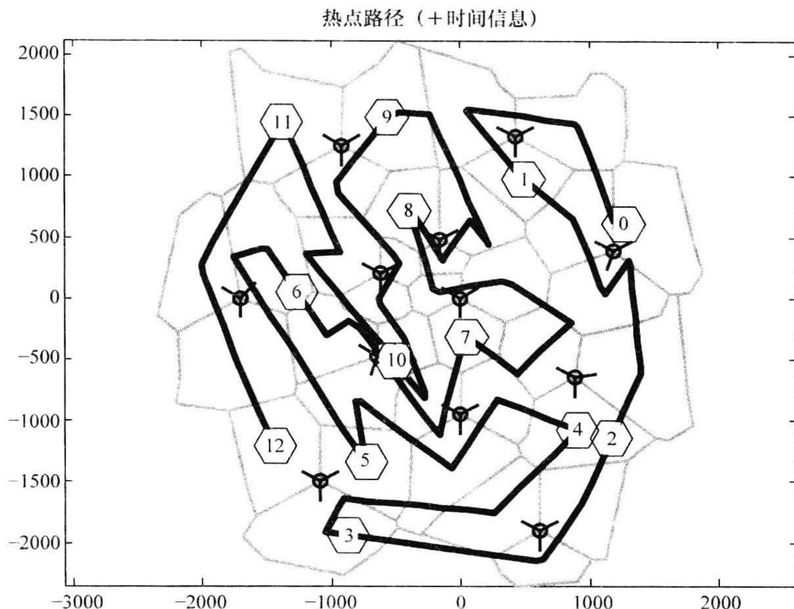


图5.45 网络拓扑与六边形热点移动路径［数字表示时间点（0：00~12：00）］

图5.46显示了网络中不满意用户数随时间的变化，即未得到300kbit/s CBR业务的用户。不满意只可能发生在热点区域，因为后台负载非常低。将该结果与网络拓扑与路径对比，可以发现当热点靠近小区边缘但未分割至两个或多个小区时可以获得增益。如果热点靠近一个eNB，所有用户处于好的无线环境中，所有用户可以得到很好

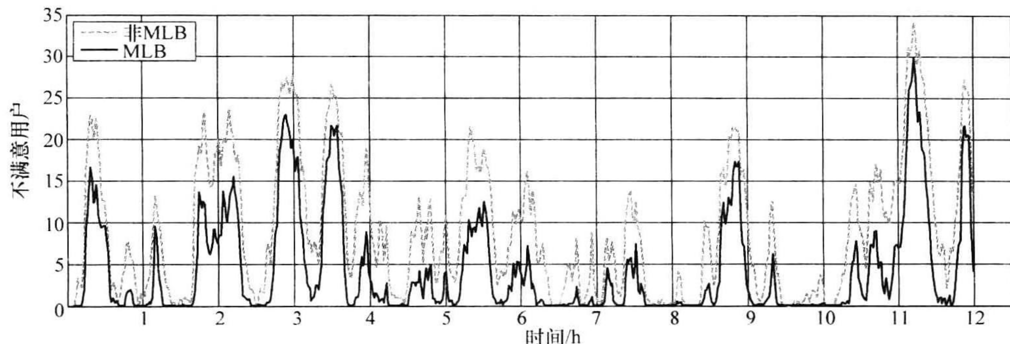


图5.46 MLB开启前后的不满意用户数

的服务。与参考情形（黑色虚线）即偏置0dB切换迟滞3dB的对称切换相比，应用负载均衡后（黑色实线）满意用户数多出5～10个。对整个网络来说这一增益不是很大，但是对于40个用户的热点区域而言增益明显。另外，结果表明负载均衡可以动态跟踪业务在1h以下的空间变化。

评估负载均衡的性能时，考虑业务集中在一个小区里造成高负载，同时靠近一个低负载邻区，在这种特定场景下，负载均衡可以获得局部增益。此外，负载均衡可能与MRO冲突，特别是在高速情形下（上述仿真中用户移动速度为3km/h）。

5.2.5.2　异系统（LTE与HSPA）场景下应用MLB

1. 基于连接建立的重定向实现负载均衡

5.2.3节比较了推入最佳层算法（PBLA）、随机将用户分配至任意层的静态机制与基于用户吞吐量的算法（UTA）。UTA算法基于用户在不同层能达到的吞吐量进行重定向判决。由于已知UE信道信息与小区负载，当负载增加时UTA性能优于PBLA。本节将阐述LTE渗透率如何影响PBLA与UTA机制的性能。考虑5MHz带宽下HSDPA与LTE提供3Mbit/s、5Mbit/s小区负载这两种场景。第三种场景考虑LTE采用5MHz系统带宽，HSDPA采用双载波（10MHz带宽），提供的小区负载保持为5Mbit/s。图5.47显示了这三种场景下，UTA与PBLA相比的平均用户吞吐量增益。该图给出了增益随LTE渗透率等级（从50% LTE终端到100% LTE终端）的变化曲线。

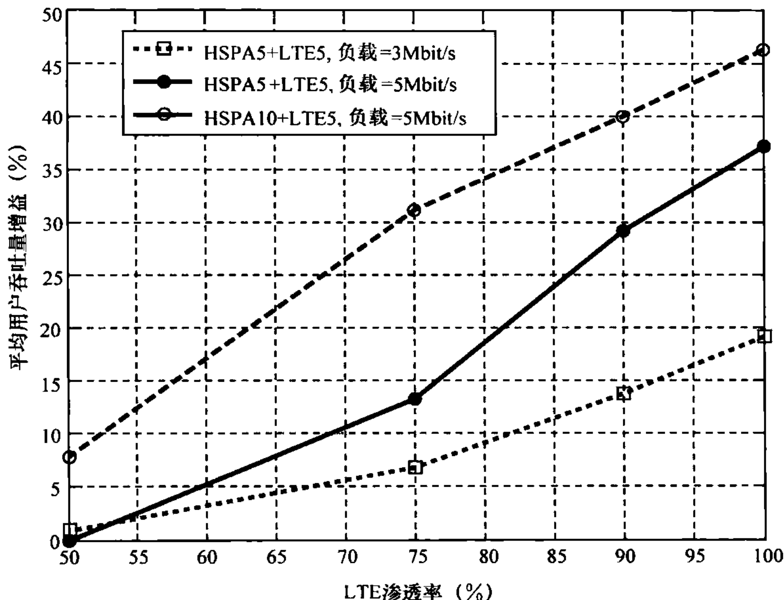


图5.47　UTA与PBLA相比的平均用户吞吐量增益和LTE渗透率的关系

如5.2.3节中的图5.26所示，100% LTE渗透率时，使用UTA在高负载增益更大。因为负载低时，每层有一个或没有激活用户的概率很大，此时两种算法没有

差别。

当使用双载波 HSDPA（DC－HSDPA）时，UTA 增益在任意 LTE 渗透率下都高于前两种场景。这是因为采用 DC－HSDPA 后，HSDPA 吞吐量翻倍，使 HSDPA 成为优选层。与随机选择用户的 PBLA 相比，UTA 机制能利用可用容量信息，因此能获得更大增益。

在任何场景下，LTE 渗透率越小，UTA 增益越小。这是因为如果不是所有终端支持 LTE，则不支持 LTE 的用户将被分配至次优的 HSDPA 层。此时，UTA 机制执行的最佳判决是将所有支持 LTE 的终端推入 LTE 层，这与 PBLA 算法类似。这样使用 UTA 将不能获得比 PBLA 更高的增益。

本研究表明，当 LTE 渗透率等于或低于 50% 时，简单的 PBLA 能获得与更高级的负载均衡算法一样的性能。当 LTE 渗透率增加至 75% 或更高时，使用自适应负载均衡算法更有效。何时适合使用静态算法的转折点取决于实际场景：例如，一方面，如果 LTE 层容量增加，静态算法在 LTE 渗透率高时仍够用；相反，如果 HSDPA 层容量增加，则 LTE 渗透率低时使用高级算法更合适。此外，考虑业务容量因素也很重要。在上述分析中，假定每用户生成的业务容量相同，没有考虑终端能力。实际上，LTE 用户可能生成比 HSDPA 用户更大的业务容量，导致低渗透率情形下使用动态负载均衡算法更有利。

2. 通过基于优先级的重选策略实现负载均衡

这里将阐述在 LTE 与 HSPA 网络提供相同覆盖的异系统场景下应用基于优先级的重选机制能获得不同的用户分布。与绝对优先级特性相关的，有两组参数可调，即重选优先级与重选门限。

图 5.48 示例了空闲 UE 重选至优选的 RAT 即 LTE 的结果。图中显示了在重选门限不变的情形下，重选优先级与不同 LTE 渗透率对 UE 分布的影响。从图中可以看出，通过设定优选某一 RAT（本例为 LTE 网络）的方式可以控制不同 RAT 间的驻留 UE 分布。

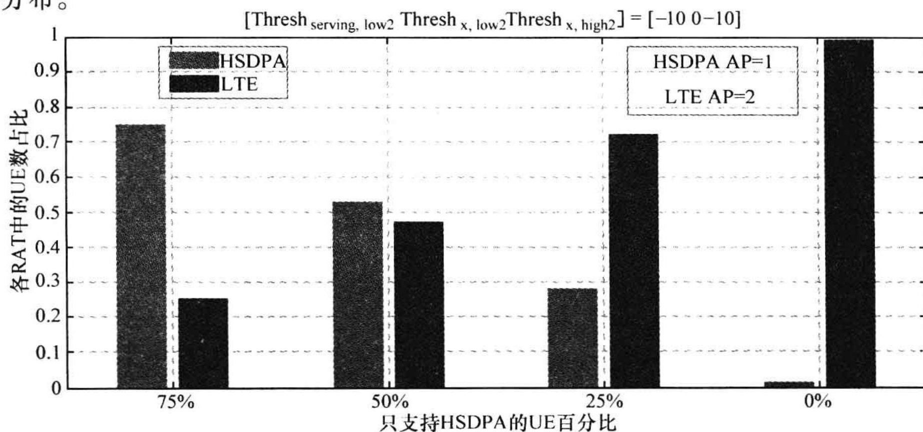


图 5.48 空闲模式 UE 分布：只支持 HSPA 的 UE 的不同渗透率［LTE 优先级 2（高），HSDPA 优先级 1（低）］

只要 LTE 渗透率适中（低于 50%），上述静态配置已足够。但是，当 LTE UE 渗透率增加时，使用倾向于 LTE 网络的配置可能导致不合理的资源利用率，并最终导致 LTE 中的用户资源不足。因此，一旦支持多制式的 UE 比例超过预期的平衡门限（本例中为 45/55），SON 策略要求能动态调整重选门限与/或优先级。如图 5.49 所示，可以通过单独调整 AP 门限平衡空闲 UE 在不同频率/RAT 之间的分布。不同频率/RAT 间空闲 UE 的分布应当与激活状态下产生的负载相反。实际的门限值取决于网络节点的配置，图中的值仅仅是一个示例。

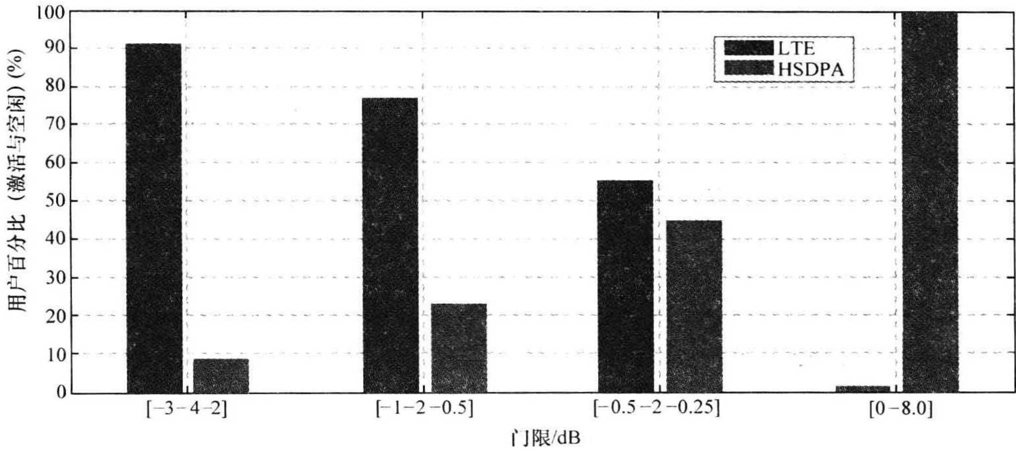


图 5.49 AP 重选门限对空闲用户分布的影响［考虑四组门限值［$Thresh_{x,high}$，$Thresh_{serving,low}$，$Thresh_{x,low}$］。LTE 优先级 2（高），HSDPA 优先级 1（低）］

假设空闲与激活模式负载均衡技术完全协同（参见 5.2.4.6 节），图 5.49 中各 RAT 内用户分布可以转换为图 5.50 所示的各 RAT UE 平均吞吐量。本例假设分组呼叫按指数分布生成，平均分组大小为 400kbit。

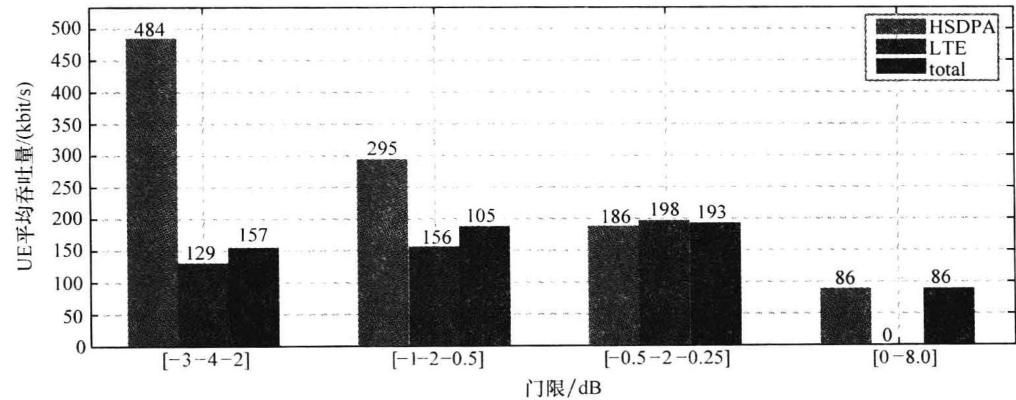


图 5.50 各 RAT（LTE/HSPA）与各系统（total）中 AP 重选门限对 UE 平均吞吐量的影响

如图5.51所示，在共站节点配置场景下，与低优先级RAT/频率相比，高优先级的RAT或频率集中了具有好信道条件的UE。

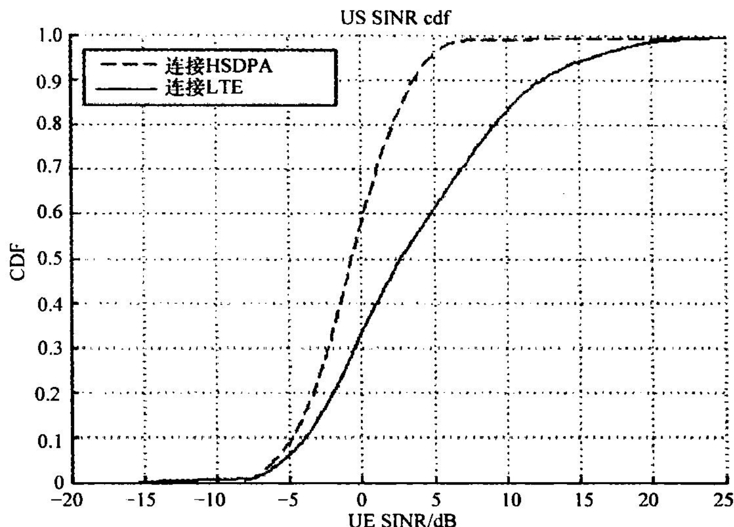


图5.51 SINR分布［LTE优先级2（高），HSDPA优先级1（低）］

3. 通过连接模式移动性实现负载均衡

这里介绍LTE与HSPA异系统场景下应用连接模式动态负载均衡的实例。如前面5.2.4.4节所述，同频切换场景下通过小区偏置影响UE的切换判决不仅导致SINR损失，还会影响干扰等级。异频或异系统的切换偏置不会造成干扰问题，但SINR也会变差。

切换参数（图5.52示例中的切换偏置）可依据服务小区与潜在目标小区之间的小区负载差自动调整。负载差越大，切换偏置越大，导致更多的切换将偏向于低负载小区。当然，切换偏置越大，用户平均SINR损失或路损就越大。小区对切换偏置需要对称调整以避免出现乒乓效应。

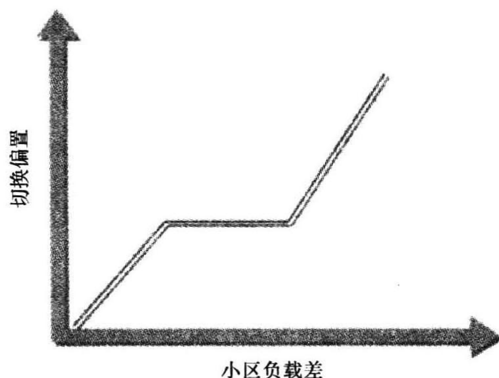


图5.52 切换偏置的自动调整随服务与目标小区之间负载差的变化关系示例

小区负载差可以映射为 UE 在目标小区与服务小区相比的吞吐量增益。这样，在切换至低负载邻区之前可以确定性能增益。以下表达式提供了采用归一化 UE 吞吐量计算负载差的实例：

$$\text{LoadDifferent} = \frac{TP^{n}_{NORM} - TP^{s}_{NORM}}{TP^{s}_{NORM}}$$

$$TP^{i}_{NORM} = \frac{TP^{i}_{UE}}{\text{UsedResources}}$$

式中　TP_{NORM}——服务小区 s 与目标小区 n 的小区平均吞吐量；

TP^{i}_{UE}——小区 i 中用户的平均吞吐量；

UsedResources——小区 i 中占用的无线资源（PRB）。

图 5.53 显示了 LTE 与 HSPA 共站宏覆盖场景下这一算法的性能结果，两个网络都采用 5MHz 系统带宽。图中给出了采用动态负载均衡前后的 UE 吞吐量百分比。按泊松分布到达的有限缓存用户被随机撒入宏小区区域，造成较高的负载。动态负载均衡明显提高了所有 UE 的吞吐量，因为它的目标是在两个 RAT 间更均匀地分布用户，如图 5.54 所示。

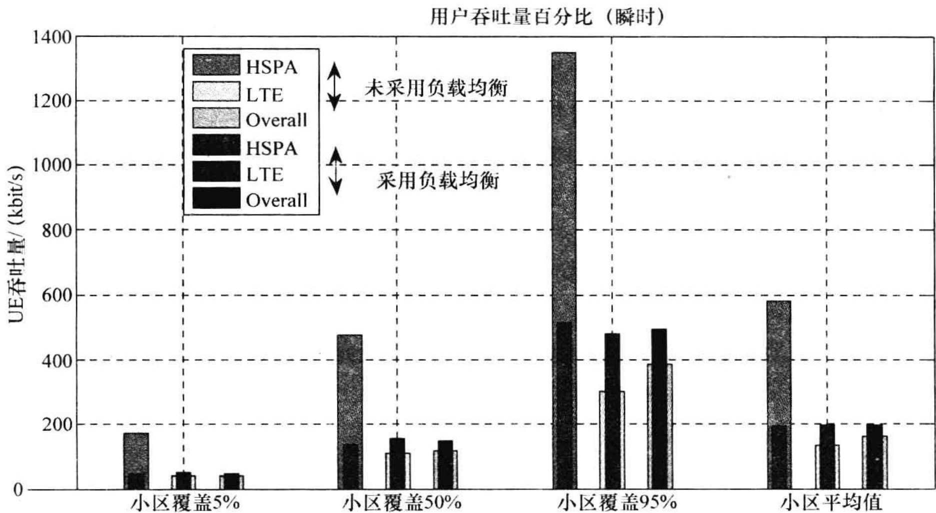


图 5.53　切换偏置自动调整的性能（UE 吞吐量百分比）

5.2.6　上行负载均衡

前面的讨论主要关注下行链路。R9 中并未明确上行链路的情况。只要下行链路负载受限，这就是一种合理的方法。事实上，现有大多数应用如网页浏览、下载等都集中于下行，但是需要保证在基于下行链路进行负载均衡时上行链路不受影响。因无线原因切换的上行用户可能对过载小区产生较大干扰，不过这仅影响一小部分 PRB；同时目标小区中的动态范围可能受到影响。只要上行容量未达到限制，这不会影响系

统性能。此外，智能功控将启用，微调功率控制参数（参见1.7.2节）。注意到在最差的情形下，如果准入控制检测到用户不适应于上行链路，目标小区会拒绝其切换请求。

前面已经讨论过，过载小区可以估计出用户是否适应于另一个无线条件稍差的目标小区下行链路。尽管上行链路也定义了综合可用容量，但是要进行这样的估计还需要更多的信息，如目标小区的干扰等级与功率控制参数。

关于上行链路负载均衡的详细研究可以参考 Nihtilä 等人的研究（2011）。本书发现由于更为严格的功率限制，控制信道受限比下行链路更为严重。如果小区的 PDCCH 不足，即使有许多 PRB 可用，小区仍需要初始化负载均衡来获得增益。

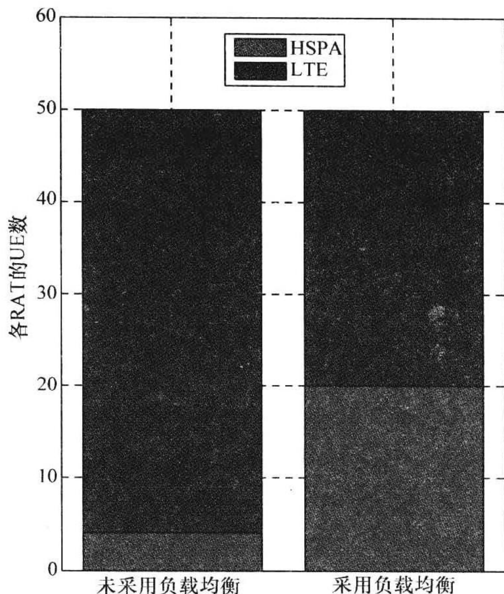


图 5.54 切换偏置自动调整的性能（UE 分布）

5.2.7 TS/MLB 与 MRO 的互操作

前面已经讨论过，流量控制/移动负载均衡一般通过如下方式实现：

1）进行强制切换判决（基于内部/厂家特定的参数）。

2）改变小区重选优先级。

3）调整空闲模式下的重选参数（如 Qoffset、$Thresh_{x,high}$、$Thresh_{serving,low}$、$Thresh_{x,low}$）。

4）调整连接模式下的切换参数，如测量报告事件 A3、A5 或 B2 的门限。

回顾前面移动健壮性优化的章节，MRO 需要调整部分相同的参数以保证没有移动性问题，即 MRO 通过如下方式实现：

1）调整触发时间、滤波器系数与重选。

2）改变小区重选优先级。

3）调整空闲模式下的重选参数（如 Qoffset、$Thresh_{x,high}$、$Thresh_{serving,low}$、$Thresh_{x,low}$）。

4）调整连接模式下的切换参数，如测量报告事件 A3、A5 或 B2 的门限。

本节阐述 MRO 与 TS/MLB 之间的互操作，适用于同频（共信道）、异频及异系统场景。在后续的描述中，将后两种场景的相关参数归纳为“移动性阈值”。图 5.55 显示了 TS/MLB 与 MRO 都影响到的参数。这两种 SON 功能都将自适应调整移动性门限。9.1 节将展开讨论这一参数冲突相关的问题。MRO 对小区重选优先级有一定影响，但是只有优先级明显的不一致时才会导致移动性问题，比如乒乓切换问题。

即使 TS/MRO 没有指定移动性门限从而避免上述冲突，切换或重选优先级修改仍然可能导致移动性问题，如乒乓效应或过早切换。如果这两种 SON 功能之间没有互操作，就可能出现 MRO 误将这些问题当作自身导致的问题而试图调整移动性门限。如果这些问题实际上是由 TS/MLB 的不当判决而非移动性门限导致的，性能可能会进一步恶化。

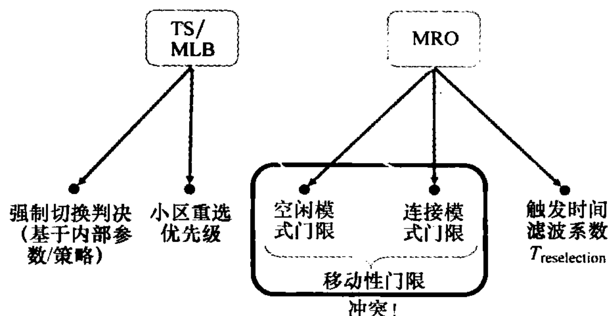


图 5.55　TS/MLB 与 MRO 影响的参数

通过高层的 SON 协调功能（参见 9.2.1 节）解决上述问题不能完全挖掘出这两种功能的潜力。紧密协作的方法（参见 9.2.1 节“SON 功能联合设计”）无疑是有益的。TS/MLB 与 MRO 联合设计可以达到最佳性能，但是限制了实现的选择。例如，MRO 在集中域管理（DM）层面的实现已经在 MRO 章节中讨论过，TS/MLB 很有可能在 eNB 实现，这种情况下的联合设计有一定难度。因此，以下将讨论一种最小化 MRO 与 TS/MLB 之间的互操作的解决方法，从而允许这两种功能独立实现。

首先，根据前面的讨论，问题可以分为两部分：

1）功能冲突（两种功能均评估移动性门限）；

2）TS/MLB 导致的问题（MRO 不应当试图纠正这些问题）。

后一个问题明显要求能够区分 MRO 与 TS/MLB 导致的问题。遵循 MRO 章节所采用的结构，这一任务的实现需要评估根本原因。就无线链路失败而言，R9 已经实现在切换报告中包含切换原因。如果切换原因是负载相关的，小区可以知道切换是由于负载原因发起的，即由 TS/MLB 发起的，因此移动性问题可以在 TS/MLB 中解决。否则，如果切换原因是无线相关的，移动性问题则由 MRO 解决。R11 中 3GPP SON 工作项目将研究前面提到的问题区分并可能提供进一步的解决方法。

前一个功能冲突的问题引发了两种 SON 功能的优先级的问题。一般认为连接的稳定性是最高目标之一。与次优的吞吐量相比，用户对连接问题会更加不满。因此，MRO 移动性门限的优先级比 TS/MLB 更高。也就是说，MRO 必须能够限制 TS/MLB 对移动性门限的修改。以下给出这一限制的实例：

1）不允许 TS/MLB 修改移动性门限。这是最简单的方法，但可能削减 TS/MLB 的潜在增益。特别是在异频与异系统场景下，源小区与目标小区之间没有相互干扰，TS/MLB 能自由的通过强制切换与小区重选优先级控制流量。

2）MRO 根本原因评估表明不存在移动性问题时，允许 TS/MLB 修改移动性门

限。MRO 章节中的仿真已经表明只有在一些小区边界才会发生移动性问题。在这些位置，MRO 将带来明显的性能提升，而 TS/MLB 可能会进一步恶化移动性。在其余的小区边界，TS/MLB 能获得增益而不会影响移动性。

3）MRO 配置参数调整范围，即移动性门限的上限与下限；TS/MLB 可以在这一给定范围内自由修改移动性参数。这一解决方式显然要求 MRO 具有智能机制以自适应调整上限与下限，但是对 MLB 施加的约束最小，且不会影响移动性。

图 5.56 显示了上面所讨论的互操作的概念。MRO 将 TS/MLB 生成的问题通知给 TS/MLB。这一信息主要用于保持小区重选优先级的一致性及强制切换判决内部策略的调整。另外，TS/MLB 可能会修改移动性门限，但是 MRO 可以利用上述的方法约束这一操作。为了完整性，图中增加了 TS/MLB 的一般输入，实际的移动性管理则基于 MRO 与 TS/MLB 的联合输入来执行。

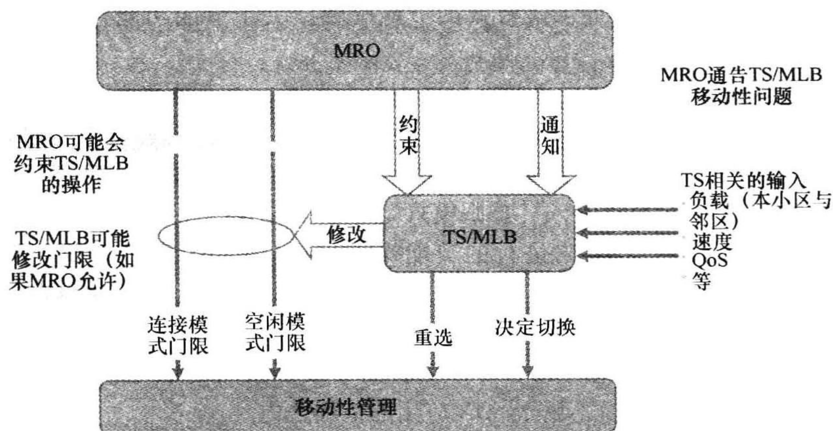


图 5.56 MRO 与 TS/MLB 合理共存的可能的解决方案

5.3 节能

节能（Energy Saving，ES）技术的发展致力于减少二氧化碳的排放和优化运营商的开销结构。无线接入网（Radio Access Network，RAN），特别是无线基站（Radio Base Stations，RBS）的总体能耗最高，因此其采用节能技术进行优化的可能性也最大。

5.3.1 背景简介

最近，移动通信行业对节能的意识和需求急剧增长。

这主要有两个方面的原因：首先，网络流量以非常高的速度增长，而且随着新技术和大量高需求的应用的发展，这种增长趋势将会持续下去。另一方面，运营商将面临用电成本的不断增长，最重要的是，运营商需要承担保护环境的社会责任。

所以，移动网络运营商现在普遍承诺通过部署高能效的网络来降低整体能耗，同

时也减少和限制对环境的影响。

传统的节能目标是在 UE 侧尽可能延长待机时间和通话时间以保证用户的满意度。如今节能的范围变得更加宽泛，整个网络的能耗变成了关注的重点。SON 的节能功能节省的不仅是以千瓦时计量的耗电能源而且还有以千克计量的二氧化碳排放量。SON 通过调用优化的网络配置来协调网元（NE），从而实现其节能功能。在此过程中，原则上用户感受不应该受到损害，因此应该保证 QoS 和 QoE 在预期的目标范围之内。从业务需求量随时间变化的表征文件可知，SON 节能的潜力很大。正常情况下，业务在晚间处于低流量的状态，在白天特定的时间区间内，即在我们通常所说的忙时（Busy Hour，BH），流量处于最大值。在忙时网络规模需要尽可能满足大业务流量需求，然而当处于非高峰时间内，业务所需要的容量仅为忙时的几个百分点。也就是说在非高峰期间，网络的很大部分的容量处于空闲状态，此时 SON 的节能功能旨在提供最有效的节能配置。关于节能功能包含以下 5 个主要方面：

1）系统间节能：如今多种系统在网络中并行部署。由于种种原因，对于 SON 来说，“单一网络”的实现方式会更加有利。这样不同的系统的容量可以互相共享。而且，不同系统通常拥有一个共同的覆盖范围，彼此互为补充。这就允许整个小区、基站乃至不同系统的分层可以进入“休眠模式”。

2）eNB 间的节能：LTE 内进行的节能操作也可以称为 Intra - LTE，通常为系统内（intra - RAT）。这种场景可以再细分为在同一 eNB 全覆盖场景和容量受限场景。

3）eNB 的节能：从概念上讲，SON 需要两个或多个网络单元进行互相的协作。因此，本地 eNB 内部特性暂不属于 SON 应用的范围之内。

然而，这些措施应作为 SON 节能功能的输入项，从而确定优化的整体节能配置。本地节能特性可以通过调整发射功率、减少发射天线数量、减少载波数量或者部署 MBSFN 和 DWpTS 来达到节能的目的。很明显，这其中的一些操作会对网络产生影响，尤其是在小区覆盖范围受到影响的时候，其邻小区也会受到影响。

4）节电硬件（HardWare，HW）/设备和本地部署选择：如上所述，设备/基站/小区的特性不属于 SON 节能的范畴。节能的设备有很大的作用。通常情况下，电能损耗与中频负载/最大射频功率的关系是主要效率指示。可以将设备/基站/小区特性指标用作 SON 节能过程的输入。这些关于电能消耗的特性是 Uu 负载的功能之一，可以通过能量模型来描述。

5）能源产生的类型：基站有很多种不同的供电方式。目前，大部分基站是与普通电网相连接的。或者根据实际情况，有可能需要通过发电机（柴油）现场发电。如果考虑二氧化碳的排放，那么显然发电机现场发电是一个比较糟糕的情况。比较有利的一种方式是通过利用现场可再生能源（太阳能、风能等）进行发电。最终需要根据纯能源消耗和二氧化碳排放量对网络的绿色环保性能进行评估。因此，在 SON 节能过程中使用的基站的能量模型偏向于二氧化碳排放量的考虑，而并不是纯能量损耗。

5.3.2 节能需求

一般来说，合理的节能算法有如下主要需求，从约束条件来讲，节能操作应该：

1）避免覆盖漏洞。在大部分实际场景中网络全覆盖对克服这种风险有很大的优势。而且，多射频基站往往会进行共站部署并且将提供类似的覆盖，其覆盖范围要大于单射频的覆盖范围。比如，专用系统（如 LTE）中的临时覆盖漏洞：从单一网络的角度来看，如果旧系统提供了基础服务，则没有覆盖漏洞存在的可能。唤醒机制可以保证 LTE 服务回退到准实时状态，这里假设所有 UE 为 2G 和 3G 终端。

2）不损害用户感知度。为了保证新进业务所需求的 QoS，业务检测机制是非常必要的。如果必须要激活新系统，旧系统应该具备判断自身是否可以达到要求的服务/QoS 的能力。当然，这里必须同时考虑 UE 的能力。

3）最大化节能潜力需要考虑电能消耗和网络流量情况。

4）避免干扰已存在的 SON 功能，甚至可以利用已定义的 SON 算法和特性的优势。

5）不会导致不稳定和含糊/不确定状态。

6）不需要在 OAM 系统级进行大量（手动）干预，仅服从 SON 的原理即可。

例如使用关键性能指标（KPI）来描述节能算法的性能。最重要的 KPI 分别是掉话率、呼叫受阻、用户吞吐量、语音质量［MOS（Mean Opinion Score，平均主观评分)］和与移动性相关的 KPI，如切换失败率。不过在使用中会有许多 KPI 的变化形式，如“平均掉话间隔”、10%的吞吐量等。为了描述节能，可以将 KPI 定义为能量/bit，二氧化碳/bit，功率/尔朗，功率/bit/s。

一种衡量节能效率并将能量效率纳入 SON 环境中的直接方法是令 KPI 达到目标值或保持在目标值范围内。实际目标值是由运营商设定或者由监督方面规定的。

5.3.3 节能管理

从管理和架构角度来看，节能可以按照 3GPP TR32. 826（2010）规定来完成，其技术报告包含列出选项以及其优缺点：

1）分布式方案将不涉及 OAM 侧。

2）集中式方案需要中央管理系统管控。这种方案要求必要的输入、节能选项的分析，从而最终触发与节能相关的操作。

3）混合结构是将分布式和集中式结合在一起。

关键的问题是在于怎样确定触发条件来激活小区开启/关闭转换和/或开始/结束节能操作。例如，在判定过程中的候选输入可以为：

1）确定时间区间（如 01：00～06：00 之间小区关闭）。

2）历史流量统计。最大的优势是可以细化到小区。而缺点是其相对比较稳定，难以处理短期波动的动态结果。长期趋势的研究可以通过一些方式（如定期的测量）来实现。

3）动态负载分析。小区可以基于准实时负载量来自动决定进入休眠模式。OAM 系统可通过集中管理的方式实现类似的功能。在完全集中的方案中，eNB 会通知

OAM 系统，例如每 5min 通知一次当前的负载情况，最终是由 OAM 判定是否需要关机。集中方式的优势是非常明显的，OAM 系统拥有所有相关小区的信息。混合方式中 eNB 可以部署 OAM 确定的门限，被时间触发后通知 OAM。所以负载的增长可用于再次激活处于休眠状态的小区。

4）QoS 请求。当正在工作的 NE/小区不能解决 QoS 请求时，非常有必要建立一个唤醒机制。

5）本地节能功能的可用性和活动性。

6）相关 NE 的能量模型。

7）设备报警、故障、KPI 报警。

5.3.4　eNB 全覆盖场景

该场景可以描述为是一个覆盖层和其覆盖范围中一个/多个扩容小区（3GPP TR36.927，2011）。覆盖层可以由 LTE（即一个 eNB）或旧系统（即 2G/3G）提供。这个场景适合以下应用：用例 1，LTE 系统一个频段内，覆盖和容量层部署不同的频率。比较典型的一个例子就是宏 - 微微小区部署。用例 1a 是对 femto 小区，如在宏蜂窝小区覆盖下的 HeNB 进行寻址。用例 2 是前面提到的跨系统情况。图 5.57 描述了对应的网络布局。

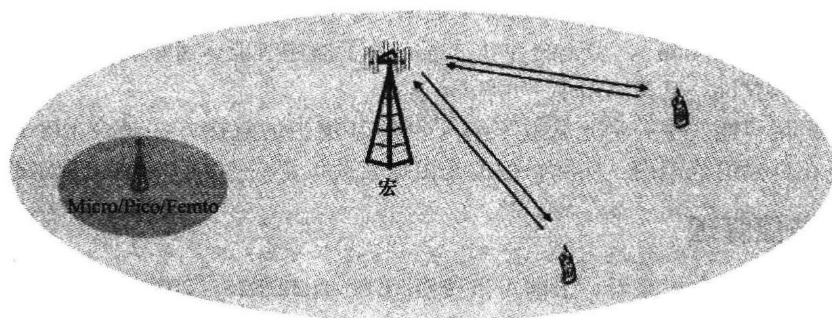


图 5.57　eNB 覆盖场景

在较低负载或没有负载的情况下，由于由宏小区提供的覆盖范围和小区容量可以满足需求，所以完全关闭热点小区（微微/femto 小区）是没有问题的。需要注意的是，这种场景也适用于增强型中继节点（Relay Node）。为了扩大覆盖面积而进行的中继部署可能会限制节能的应用。

在 3GPP TR36.927（2011）中已对 eNB 覆盖场景进行系统研究。“跨系统场景 1”中的覆盖层由旧系统［如 GSM（2G）和/或 UMTS（3G）］提供。第二种场景称为“inter - eNB 场景 1”，因此该场景中热点和提供覆盖的小区均为 LTE 小区。

下面将讨论主要问题和潜在解决方案：

1. 小区开/关转换基本过程

1）通过定期配置管理。

2）通过从 OAM 系统下载本地策略，需要使用固定时钟。此外，自主判定需要额外的负载信息。

3）跨系统的信令不经过 OAM，而且当受到负载量驱动时，应该通知（跨系统）相邻小区判定结果并且允许请求开启小区开关。

2. 怎样开启正确的小区

宏基站的控制节点可能会检测到分流的需求。用户分布远远偏离平均值，因此从覆盖角度来看，热点对卸载流量的贡献度是非常复杂的。此时需要找出最优的候选项，也就是最有能力分担负载的热点。

一些候选的解决方案如下：

1）基于预先定义的每个热点的高负载/低负载周期（数据可能来源于历史流量统计数据），可以选择开启具有最高/较高（历史）负载的热点。

2）应打开所有热点。低/无负载的热点在开启之后可以再次关闭。

3）主要的热点保持监听模式以获得热噪声干扰（Interference over Thermal Noise，IoT）。每个热点的 IoT 提供了一个较好的指示以表示是否有（或有多少个）处于活动状态的用户在附近。图 5.58 用一个实例情况说明 3 个在宏扇区覆盖下的热点 IoT 的结果。示例中使用点来标识用户，并假设每个用户对整个宏蜂窝的负载贡献都一样。大多数情况下，IoT 原始数据可以明确指出哪个热点是需要激活的目标。在个别特殊情况下，热点并不是均匀分布的（靠近或远离宏基站），路径损耗受 UL 功率控制影响，因此需要考虑这些特殊情形并提高性能。在图 5.58 给出的示例中，由于小区 1 占总体负载量的 50%，因此非常明显小区 1 是最优的激活小区（小区 1、2、3 的负载关系是 2:1:1）。

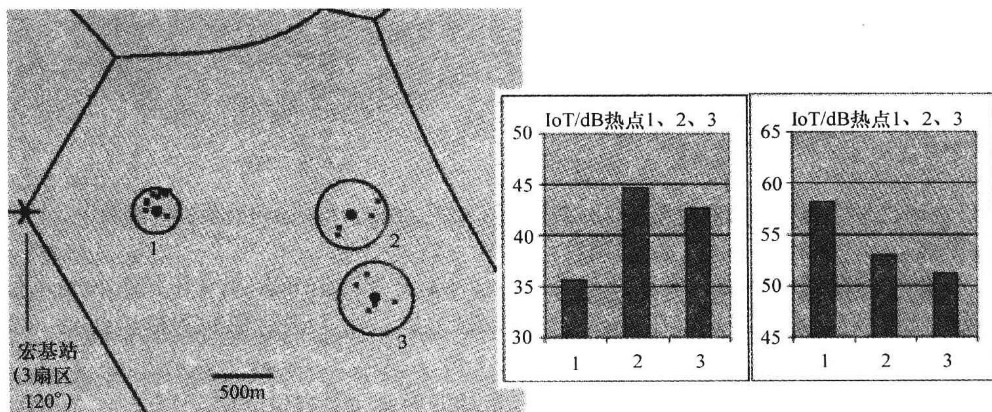


图 5.58 IoT 样本：原始数据和校正（IoT * = IoT - PL + 功率补偿）

4）未激活的热点处于监测阶段，也就是说，基站发射 DL 参考信号对未激活热点进行测量。参考信号（“导频”）可以通过空闲状态和连接状态的 UE 进行测量，并且应该将测量结果上报给宏网络的 eNB。后者可以做出恰当的激活小区的判定。

5）在尝试确定 UE 定位的方法和热点地理数据的基础上，正确地激活邻小区。

3. 如何有效关闭小区

3GPP R9 中，关机的判定属于实施细节，并且这些判定之间不一定会有协作关系。这里有两个问题需要重点分析：①如何最大限度地提高整体能源的使用效率；②如何避免由于交换机关闭而导致的过负载情况。对于该解决方案的建议如下：

1）方案 1：覆盖小区监测自己和邻小区的负载情况并作出关闭热点的判定。

2）方案 2：热点发送小区关闭请求，由覆盖小区作出判定。

4. 协作信息交互

本地策略不一致可能会造成频繁的小区开关（"乒乓效应"），如热点切换、宏小区请求开机、热点关闭等。另一个问题是在宏网络的容量足够的情况下发起不必要的开机请求。这种问题可以通过交换相关的节能参数来解决。

5.3.5　容量受限网络

3GPP TR32. 826（2010）中在节能相关的章节引入了节能容量受限场景，并将该场景定义在"inter – eNB 场景 2"（3GPP TR36. 927，2011）中。在图 5. 59 中描述了这类节能主要的原理：在满载下，处于流量高峰期间，所有小区均处于非节能状态来分担网络流量，也就是说，要保证目标服务等级（Grade of Service，GoS）/QoS。在非高峰流量的情况下，激活小区的数量将会减少，将部署节能补偿小区/基站以保证全面覆盖。此外，目标 GoS/QoS 保证了节能补偿小区/基站能够提供充足的网络容量。节能补偿小区/基站是可以完全关闭的。

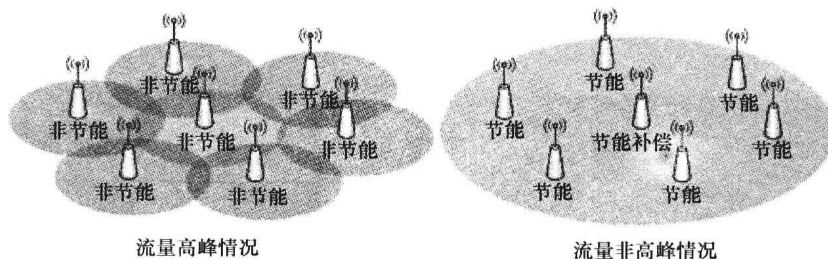


图 5. 59　容量受限网络场景（3GPP TR36. 927，2011，得到 3GPP 的许可复制）

从网络规划角度来看，基站间的距离和每单位区域基站的数量受电磁波传播的限制或由流量/容量需求决定。在人口稀少的农村地区，为了达到预期的覆盖效果（在"覆盖受限"场景），基站密度需要足够大。

在市区/市郊地区，用户密度和所需容量均非常高（"容量受限"场景）。在网络忙时，流量需求（尔朗/km^2，Mbit/s/km^2）这两个参数定义了平均小区范围。由于这种为网络忙时设计的衡量方式，根据每日/每周/每季度/每事件等流量变化的需求，大部分时间里网络是超过度量范围的。容量的动态适应能够实现节能。详细地说，通过开启/关闭全部小区或全部基站来减少小区/基站密度，可以完成这种适应机制。

值得一提的是，在容量受限的情况下需要对覆盖进行控制。覆盖面积过大反而会适得其反，因为这样会给相邻小区造成干扰（"干扰受限"场景），尤其在一般情况

下频率复用的部署为1/1时。为了限制上面提到的问题，需要采用限制覆盖范围的方法，如天线下倾、正确的方位设置、减小功率、降低天线高度。

考虑到网络中小区密度的动态变化，这些设置也应进行动态处理。因此，伴随着开关机尝试的还有一些配置的修改（天线高度、方位角、下倾角、发射功率），这是为了对覆盖面积进行管控。值得注意的是，这种操作也会影响其他的网络规划，如RACH/PRACH配置、PUSCH/PUCCH设置/跳频、PCI分布/优化、MRO等。这种情况就需要深入分析和非常小心地处理（参见第9章SON操作）。此外，还需要密切观察网络性能，如这里推荐通过KPI、MDT进行观察。因为很难预测覆盖情况，所以造成覆盖漏洞、干扰、移动性问题的风险还是非常高的。

过渡阶段似乎是特别困难的，这需要尽可能减小对连接状态和空闲状态UE的影响。由于所处网络变化或者直接算法的触发，处于连接状态的UE可能在过渡阶段正在进行切换操作。而空闲状态的UE应可以接入网络并且在整个过程中均可获得寻呼信息。需要避免覆盖漏洞和强干扰。

为了从系统角度描述应用场景和相关算法，图5.60引入了下面的节能状态和状态转换（3GPP TR32.826，2010），NE可以处于以下状态：

1）非节能（No-ES）状态：没有ES相关测量进行中。

2）节能状态：网络单元关闭或限制资源。

3）节能补偿状态：网络单元确保覆盖。

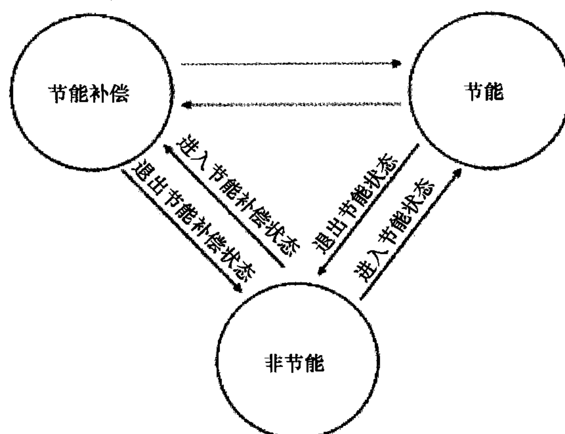


图5.60　网络单元：ES状态和状态转换

5.3.6 设备/本地节能

除了关机选项，运行设备更显著的动态适应和进一步节能措施是利用先进高效的节能硬件实现的，需要特别关注的是本地部署选项和对可再生能源的利用。通常使用能量消耗来描述基站的电力消耗模型，如空中接口中频负载、最大射频功率等。这些模型种类繁多，实际的计算取决于设备供货商、实际部署、温度等，因此很难进行标准化。

作为典型的模型，假设其呈线性特性：

$$P = P_0 + mP_{RF}$$

式中　P_0——运行的空载 RBS 的功率消耗，关闭 RBS 或硬件部分的功率消耗 P^* 降低到 $0 < P^* < P_0$。

射频发射功率不一定是线性的，主要取决于实际负载/活动：$P_{RF} = P_{RF}$（负载）。

具体来讲，需要对每个组件的功率消耗进行估算。在《EARTH INFSO - ICT - 247733（2010）》中有很详细的叙述。

有很大一部分功率损耗来自于冷却过程，因此（根据时间变化）温度和位置（气候，室外/室内）产生很大的影响。另一个主要关注点是实际的配置。带有射频拉远单元（Radio Remote Head，RRH）或远程射频的分布式部署，如图 5.61 中的实例，对节能预算有很大的帮助。典型的馈线加跳线的损失分别为 2dB、4dB（注意，因子 2 近似为 3dB），而通常跳线的损失 < 1dB。

为估算一段较长时间内总的能量消耗，如 24h，不同的时间段可以简单地总结为

$$E_{\text{total}} = P\int_{\Delta T} P(T\{t\},\text{load}\{t\},\text{ESmeasures}\{t,\text{load}\})\,dt$$

式中　T——温度。

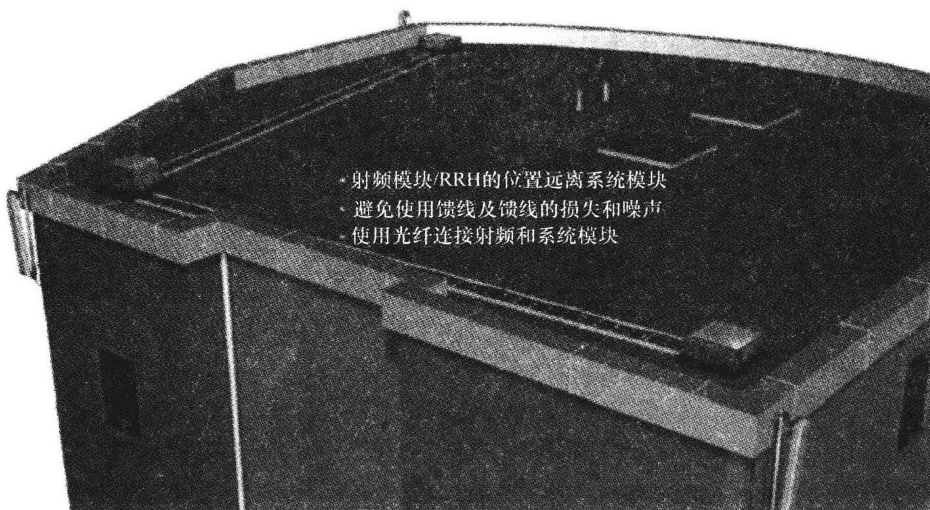


图 5.61　远程：由于无馈线的部署得到较高的节能增益并且需要较少的接入控制

ETSI TS 102706（2007）中定义了测试专用的 RBS 基站能量消耗。虽然这项研究的范围主要包括 GSM/EDGE、WCDMA 和 WIMAX，但也可以很容易将其扩展到 LTE 的研究中。需要区分集中式和分布式 RBS 这两种主要场景。集中式 RBS 场景下，功率消耗为

$$P_{\text{site}} = \text{PSF} \cdot \text{CF} \cdot P_{\text{equirement}}$$

其中冷却因子（CF）和电源供电因子（PSF）是校正因子。在分布式场景的公式中同时考虑 RRH 特性问题。

这里强调的消耗是从纯能量的角度来考虑的。为了解决二氧化碳排放的问题，额外排放的二氧化碳可以直接映射到电力排放因子中（A WRI/WBCSD GHG Protocol Initiative calculation tool, 2007）。

根据当地电力结构的不同，这一因子的取值也不同，如全球、欧洲、美国分别为 0.502kgCO_2/kWh、0.341kgCO_2/kWh，0.573kgCO_2/kWh。

为了激发可再生能源（太阳能、风能、混合能源）的使用，可以从基站的资产平衡表中减去相应的部分。

5.3.7　实例场景和期望增益

为了估算潜在解决方案的增益，需要定义一个基准线。必须定义的分析包括输入量、流量模型和能量模型。单个节能特性的效率可以通过一个 24h 分析：①激活节能特性和②基准线（非激活节能特性），进行量化分析。

多个节能特性并行运行将会更加复杂。单一的节能增益将会累加在一起，但也会有部分是彼此重叠的。

比如：

1）不同网络同覆盖的场景，如图 5.62 所示。

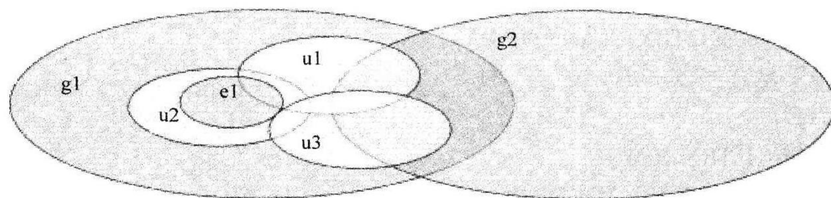


图 5.62　例子：系统间覆盖（考虑 g1、u2、e1 的覆盖区域）

2）考虑节能区域位于 e1、u2、g1 的共同覆盖范围内。

3）e1：eUTRAN 小区 1。

4）u1、u2、u3：UTRAN 小区 1、2、3。

5）g1、g2：GSM 小区 1、2。

为了考虑 QoS 约束条件，需要作出以下假设（不同 UE 性能混合）：

1）20%类型 A（仅 2G）。

2）40%类型 B（2G、3G）。

3）40%类型 C（2G、3G、LTE）。

进一步的输入是 A、B、C 类 UE 一天内不同时间段的流入业务量的分布，如图 5.63 所示。

这里对 RBS 配置和电能模型进行简单假设，需要注意的是，为了达到节能的目的，减少二氧化碳的排放，电能消耗也用“二氧化碳排放量”来表征。电流容量与实际吞吐量的比即负载 L。除了关闭整个小区，还需要考虑本地基站内节能措施：关闭 TRX。这里使用 N_ TRX 来计算开启的 TRX 数量。

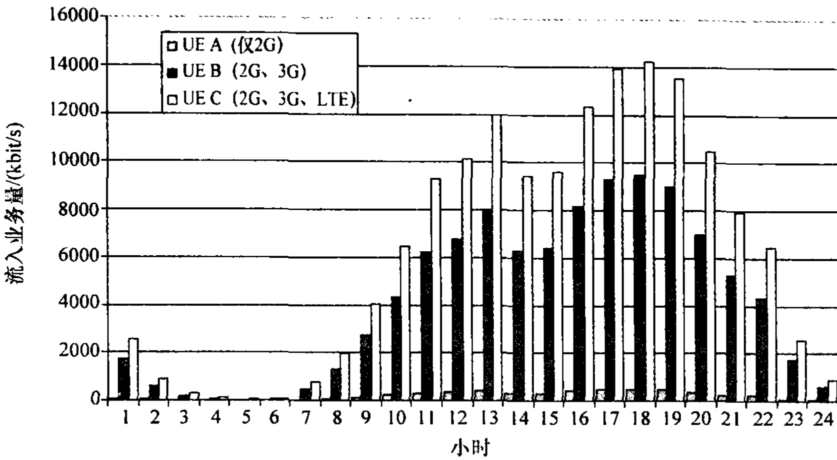


图 5.63　流入业务量（kbit/s）一天内的分布（每小时）

1. 2G

1）配置：1～4 TRX（GSM/GPRS）。

2）CO_2 足迹：Cf＝35＋20*N_ TRX＋40*（N_ TRX－1）*L。

2. 3G

1）配置：1 或 2TRX（UMTS/HSPA）。

2）CO_2 足迹：Cf＝45＋20*N_ TRX＋40*N_ TRX*L。

3. LTE

1）配置：1 TRX 10MHz。

2）CO_2 足迹：if*L*＞0.25 Cf＝20＋40*L－30 *else* Cf＝0*。

假设采用可再生能源当场发电可以节省 30 个二氧化碳单位。

图 5.64 显示了所示场景的预计增益。由于 LTE eNB 利用现场可再生能源进行发电，效率非常高，因此完全关闭这个基站并非最佳选择。在一些特殊的情况下，比如在夜间，关闭 3G 基站是最优的选择。通过 2G（非 LTE 终端）和 LTE 网络来补偿流量损失。这种做法中可以获得 1/5 的节能增益，也就是说，二氧化碳的排放量减少了 20%。增益的大小取决于实际输入参数（业务混合、UE 性能、基站模式、室内/室外实际部署、温度、绿色能源现场发电等）。因此，实际获得的增益可能会相差较大。特别是当基站的部署效率很低的时候，系统间节能增益将明显高于 20%。

应当指出的是，这个实例给出的是一个仅考虑节能问题的观点。只有完成总吞吐量核对并进一步考虑如 UE 性能限制、QoS 约束、运营商策略、网络共享策略等才可以限制某些场景。

5.3.8　小结

由于全球环境保护意识的提高和能源法案的强化，节能技术近些年吸引了大家浓厚的兴趣。因此，能量/kWh 和二氧化碳排放量/kg 成为描述节能性能的重要指标。除了本地的部署和高效设备的解决方案，系统内或者系统间的几个基站之间的互操作

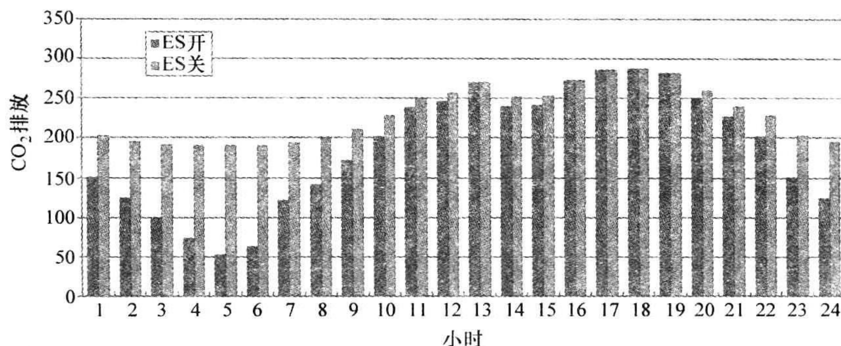


图 5.64 预算增益（二氧化碳排放单位与 h/天）

也会对网络的整体资产负债表产生很大的影响。然而所有的节能操作应该保证网络的 QoS 和 QoE，保证正常覆盖和用户的访问。

目前 SON 的节能技术的研究还处于刚刚起步的阶段，下一步应该继续分析研究负载造成的影响。

5.4 覆盖与容量优化

手动进行网络覆盖和容量的优化通常是成本较高且非常耗时的任务。因此覆盖与容量的优化（Coverage and Capacity Optimisation，CCO）用例的目的是为了网络资源的自动优化。一个小区的容量和覆盖范围会因为环境的变化而变化。这些变化是多种多样的，比如季节带来的变化，树木在冬季凋零而在夏季变得枝繁叶茂；还有人为引起的环境变化，包括建造或拆除建筑物，新建或删除基站，或者在网络规划阶段做了错误的参数选择。这些变化还体现在：白天的繁忙时段与晚间的空闲时段相比，不同的小区需要的覆盖和容量也不尽相同，这是因为流量分布也可能会发生变化。然而在这种场景下，举例来说，繁忙时段网络的变化速率会变慢。当现有环境变得与网络规划配置时所做的环境假设不同时，相比较最优化配置时的性能，此时的覆盖与容量将会下降。这种次优化的覆盖和容量将会导致网络资源的浪费和通信质量的降低。例如，小区覆盖规划得很差将使小区之间的干扰较高，整体频谱效率变低，同时需要更多的硬件来服务用户的业务流量。环境的改变通常发生得相对缓慢。由于变化较为缓慢，因此网络也不需要做快速的反应。所以当变化已经大到足够影响网络性能时，CCO 相关的算法会在较长的时间段内执行，除非 CCO 可以在不同的时间由网络不同的部分来完成，通常在相关 KPI 超过阈值的参数值时触发。

CCO 除了可以应对不断变化的网络环境外，还可以在网络规划阶段提供帮助。因为有 CCO 的缘故，所以不需要非常精确的网络规划。规划时使用一个粗略的网络规划就足够了，当基站激活之后根据测量报告和定时器再进行优化。例如，对于运营商来说可以使用已有的3G 网络去规划 LTE 网络，然后让 CCO 完成所需的调整以补偿3G 和 LTE 之间的差异。该方法能够减少手工劳动、节约成本和规划阶段所需的时间。

重用3G 网络的设计去规划 LTE 特别适用于3G－LTE 共站址的场景，此时对于已经安装好的 LTE 基站，只需要进行最少量的额外网络规划。

采用 CCO 的主要目的是使用最少的无线资源来为整个网络提供足够的覆盖和容量。CCO 用例可以进一步划分为 3 个次级目标：最大化相对覆盖范围以实现连续覆盖，这里相对覆盖范围的定义是，接收信号的质量高于最低所需的接收信号质量的概率；通过整个覆盖区域内能够达到的比特速率来提供足够的信号接收质量；最大化系统容量（Mbit/s）。因此 CCO 的引入，使覆盖范围、小区边缘的比特速率和小区吞吐量都得到了提高。从无线资源的角度看，实现全覆盖的成本非常高昂，因此通常需要在以上三种目标之间做出权衡，并且这些目标之间的比重应该在运营商的控制之下。

有多种方法可以满足 CCO 的目标要求，譬如调整天线参数就是最常用的一种方法。该方法需要在基站使用遥控电调（Remote Electrical Tilt，RET）定向天线或者有源天线。通过调整天线倾斜的程度、半功率波束宽度和天线指向的方向提供足够的覆盖范围，此时会在小区的不同角落分配合适的信号电平。其他方法还有调整下行发送功率、传输的参考信号功率或功率控制参数的优化等。

对于 SON 的所有功能，CCO 的逻辑算法由网络设备供应商定义，同时3GPP 标准也支持 CCO 功能。在 3GPP 规范中 CCO 功能通常会使用集中式的架构（参见 3.4 节），也就是说，CCO 功能位于 OAM 系统（3GPP TS32.522，2011）。3GPP 中实际的优化方案是在 OAM 系统中实现的［不管是区域级管理（Domain Management，DM）还是网络级管理（Network Management，NM）］，其中对覆盖和容量的相关问题的监测是由系统 SON 的其他用例完成的，即最小化路测（Minimisation of Drive Test，MDT）和位于 eNB 的移动鲁棒性优化功能（Mobility Robustness Optimisation，MRO）。MRO 和 MDT 检测到的与基站有关的问题会通知到 OAM 系统。当 CCO 处于网络级管理的状态时，则通过 DM 和 NM 之间的标准化（非 SON 特定）管理接口（北向接口）来通知 OAM。因此大部分 CCO 相关的标准化都与北向接口有关。用来集中优化覆盖与容量的配置参数与用来补偿处于节能（Energy Saving，ES，参照 5.3 节）状态的小区或者失败（Cell Outage Compensation，COC，参照 6.4 节）的小区的参数是有重叠的。因此，在需要执行 CCO 功能的应用场景中，还需要针对 ES 和 COC 的出现进行协调（参照 9.1 节）。

5.4.1　基于自适应天线的覆盖与容量优化

天线倾角控制一直都是每一代蜂窝技术中一项重要的优化工具。过去的部署方案中所使用的天线解决方案在规划阶段就固定了下倾值。这一限制意味着天线倾角后续调整的成本很高。RET 的引入使得在以前没有成本效益的领域内进行天线的优化成为可能。RET 天线的使用免去了爬塔作业和基站实地勘察，因为倾角可以通过 O&M 子系统进行控制。因此，对于网络运营商来说，遥控电调已经成为了以自组织方式优化容量与覆盖的一种很有吸引力的手段。

天线下倾分为机械调节和电子调节两种方式。与机械调节方式（Siomina 等人，2006）不同，电子下倾调节是通过调节天线单元的相位来均匀地调节波形的主瓣、侧

瓣和背瓣（Lee, 1998）来达到所需要的下倾角度的。因此，正如 Yilmaz（2009a）讨论过的，电子调节可以获得更高的优化效果。现有的电调下倾的技术包括远程电调（Remote Electrical Tilt, RET）、可变式电调（Variable Electrical Tilt, VET）和固定电调（Fixed Electrical Tilt, FET）。机械下倾可以通过远程地使用电动机直接使天线或者天线单元的倾斜程度改变。对于网络运营商来说，遥控电调的使用更为广泛，如在新建或删除 eNB 时需要调节下倾角。但是另一方面，与机械调节相比，电子调节的倾角范围有限，所以仍然需要机械调节方式。

有源天线系统（Active Antenna Systems, AAS）对于 CCO 的概念来说是一种可靠的手段。该方案能够通过调整一些天线参数，如倾角、方位角或波束形状，来提供更高的系统性能和无线网络容量。事实上，AAS 能够作为实现 SON 的一种手段，是因为该系统可以适用于多种场景。除了可以优化覆盖与容量外，AAS 也是补偿小区业务量过载的有力工具。

倾斜角的调整对于小区覆盖边界的影响具有立竿见影的效果。这种影响取决于天线的高度与天线到小区边缘的距离的比值，此外还受这中间网络拓扑的影响。但是，需要指出的是在扇区的全方位角度范围内，电调倾角上一次简单的改变对于小区边缘也具有相似的影响。因此，错误的天线倾角会导致小区覆盖性能变差或较强的干扰（Yilmaz 等人, 2010）。当过多的天线进行倾角调节时，会导致小区边界的通话质量变差，同时系统也会发生掉话、连接失败或切换失败，覆盖问题往往在此时发生。对用户来说，这意味着无法保障服务的连续性，或者网络中某些地区的服务质量降低了。而当天线下倾角度太小时，天线会指向被向相邻小区所覆盖的区域，从而产生了多余的干扰，这就是所谓的越区覆盖问题。超出的这部分干扰会降低邻区用户在下行链路上的信号质量和该小区的容量。而在上行链路，其他小区的用户也会对该小区（使用的天线下倾角度过小的小区）造成额外的干扰。通过上调天线的倾角可以缓解所处小区的覆盖问题，同理下调天线倾角可以降低小区内的干扰和容量问题。

CCO 所面临的挑战之一就是如何确定检测问题发生的位置，另一方面就是如何解决问题（如上调/下调天线倾角）。针对每一个子网，可以基于需求进行倾角调节或者其他参数优化。在一个子网中，如果满足一定的条件就会启动优化操作，如过多的无线链路失败或者吞吐量较低。无论下调或上调天线倾角都需要仔细操作，以避免覆盖问题变成干扰问题，反之亦然。同样的，在同一时间同一片区域内，优化操作只能在一个小区里进行。这是为了避免其他的问题，如两个小区都取消操作或者都放大操作从而导致新问题的出现。实际上，对于倾向于集中优化方式的多个小区，进行共同优化往往是有益的。由于上述问题的存在，天线参数优化操作不宜太过频繁。而小区负载均衡需要对不断变化的负载情况做出快速的反应，这也是倾角调节不适用于负载均衡的原因所在。

Yilmaz 等人（2009/1）已经讨论了天线参数的影响，包括不同天线下倾技术对 LTE 网络覆盖和容量的影响。尤其值得注意的是，对于 3GPP 中定义（Yilmaz 等人, 2009/2）的干扰受限或者噪声受限的仿真场景来说，电调倾角的优化都能在覆盖和容

量上提供显著的增益。基于 Yilmaz 等人（2011b）的成果，5.4.2 节中将给出针对使用 AAS 的集中式 CCO 的性能分析。

5.4.1.1　天线在 SON 中的应用场景

下述用例都与小区有效边界的变化有关，因此这些场景都可以通过改变天线模式来实现。在 3GPP SON 解决方案中主要是通过改变切换偏移参数来实现上述用例，而并非改变实际的小区覆盖范围。

CCO 可能是基于天线的矫正方案的最佳方式，原因在于它不会通过改变切换偏移量来增大小区覆盖范围，这一点和其他场景不同。这种情形下，上调天线指向失败的小区来提供所需的额外覆盖区域才是合理地选择。

移动性负载均衡需要在本小区和相邻小区的边界之间做动态的调整，以应对小区内的过载情况和保证邻区的可用容量。

移动鲁棒性是通过修正切换地点以确保足够的覆盖重叠区域从而支持切换的。这是因为一些重叠区域的减少会导致大量不必要的切换。

在拥有足够的邻区重叠覆盖范围的区域，在非峰值业务期间内从服务中删除小区就可以实现节能的目的。这项技术与小区业务量过载补偿技术相似，后者针对本小区内无服务的区域，通过相邻小区尽量延伸覆盖范围进行补偿。

5.4.1.2　优点

3GPP 中规定的 SON 技术是通过邻区指定的切换偏移量修改来实现对小区边界的调整的，这就意味着切换不会发生在小区之间的等功率边界上，而是发生在减去偏移量和滞后量的地点。基于天线的 SON 方案改变的是实际的小区覆盖的位置，而不是调整偏移量，因此再减掉滞后量，切换可以发生在非常接近等功率边界的地点。

5.4.1.3　缺点

基于天线的 SON 技术的主要问题是有限的反馈回路。调整天线带来的覆盖范围的改变是很难去测量的，在传统网络中通过小区路径测量来衡量这种变化。而这种测量并不是 SON 技术中的功能，因为它与 SON 成本和时间需求相违背。在数据中心网络（如 LTE）中，明显地减小路径测量的价值，这是由于该测量原本的目的只是确定街区级别的覆盖。而现在大部分用户是位于室内并且分布在大量的楼层中。天线的调整能够正确地修改原本的切换点但是也可能造成覆盖漏洞或者是对小区中其他部分造成干扰。对于小区边界上的天线调整产生的影响，集成的无线规划工具可以在一定程度上作出预测。然而，其预测的精确性往往受到限制，尤其在预测城市高层环境的覆盖范围的时候。另外，最小化路测的功能也是 SON 功能的一部分，往往用于检测网络的覆盖范围和干扰情况。

基于天线的 SON 技术具有一些固有的时延。在电调倾角的情况下，调整到新的下倾角度的过程存在着时延。该时延在 RET 中并不是问题，但是会给小区边缘的覆盖带来潜在的负面影响。合理的做法是以非常小的增量进行变化，在做进一步的调整之前允许足够的数据流来验证所有的变化。

5.4.1.4　成本

基于天线的 SON 技术需要一些额外的硬件支持，这会增加网络部署的总体成本。

而与传统的手动优化相比，SON 大幅节省的操作抵消了这些额外的成本。额外的成本主要来自 RET 天线系统。尤其在现有的2G/3G 网络中使用原已安装好的天线时，进行 RET 部署的成本问题可能会更加突出。

5.4.2　基于 CCO 的天线参数优化的性能分析

该评估方法旨在创建这样一个场景：可以从不同的方面评估其中的优化操作，这意味着会对系统中覆盖和容量的问题进行描述和分析。在性能评估中，使用10%和50%的吞吐量和 SINR 的累积分布函数（Cumulative Distribution Functions，CDF）作为性能指标，其中可以将第10%的吞吐量分布看作小区边界用户的性能。因此通过对10%的吞吐量设置一个最小的需求就可以分析系统的覆盖范围。另一方面，50%的吞度量则表示系统中所有用户的平均吞吐量，也就是表明了系统的容量。通过使用无线网络仿真器可以产生吞吐量和 SINR 分布，该仿真器的性能指标用于衡量多个 eNB 和可变数量的移动用户。

5.4.2.1　场景

模拟的 LTE 网络规划场景源自 Laiho 等人（2006）研究的 3G WCDMA 场景，如图5.65所示。之所以选择一个3G 的规划方案用来仿真，是因为3G 规划虽然会导致次级优化，但对 LTE 网络来说仍然是较为实际的初始状态。由于3G 网络使用宏小区分集，所以网络需要小区之间更多的重叠区域。对于依靠硬切换的 LTE 网络来说宏小区分集并不是最佳方案，重叠区域过多将带来小区间更多的干扰。

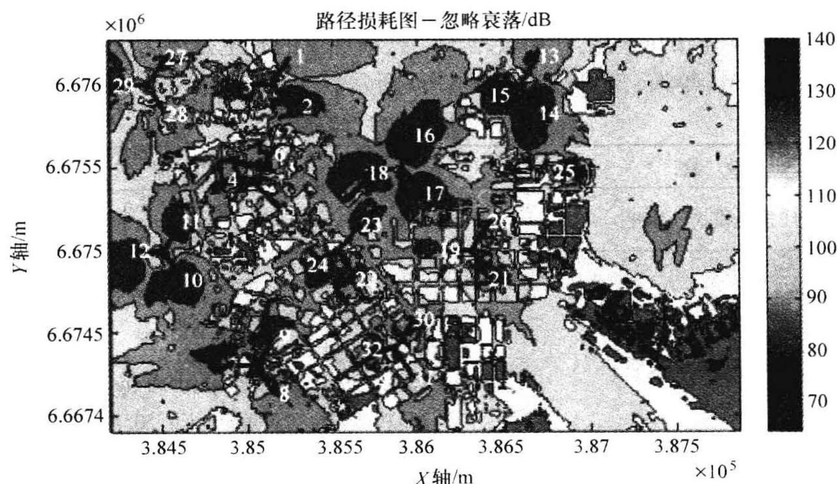


图5.65　赫尔辛基市中心的网络拓扑和链路损耗不包括任何阴影衰落

仿真区域内的用户分布考虑到不同位置的分布，如建筑物、街道和水域等。仿真通过增加阴影衰落、快衰落和加入路径损耗的天线配置的影响建立传输建模型，并使用射线追踪进行计算。使用 Zheng 和 Xiao 研究（2002）中提到的统计正弦曲线求和的方法建立快衰落模型。仿真中使用的用户移动性限制到海岸线为止。引

用3GPP - TR36. 942（2010）中规范化的链路级仿真结果，将系统级仿真计算得到的 SINR 映射到吞吐量上就可以评估系统级的吞吐量了。链路级仿真是在 6 - tap 的典型城市（Typical Urban，TU）信道和 10km/h 的用户移动速度的仿真假设下完成的。

仿真过程会考虑系统级的带宽效率来消除下行的控制和导频信道的开销，该开销来自下行共享信道（Physical Downlink Shared CHannel，PDSCH）的计算结果(Mogensen 等人，2007)。由于仿真区域是有限的，因此网络部署方案中边界位置上的小区间的干扰水平较低。为了使仿真场景更贴近实际，性能评估和优化将不包括靠近网络边界的小区。

天线参数建模和主要仿真假设都遵循3GPP 协议中用于 LTE 和 LTE - Advanced 技术（3GPP - TR36. 814，2010）性能评估的参数，并在表 5. 5 和表 5. 6 中列出。

本书中需要优化的自适应天线参数定义如下：

1）天线方位角定义为该天线所指向的方向，以正北为参考方向。

2）半功率（3dB）波束宽度（Half - Power（3dB）BeamWidth，HPBW）定义了天线的口径。在水平和垂直方向图中，沿主辐射方向辐射功率达到 - 3dB 的点即定义为 HPBW。HPBW 发生的变化不仅会影响天线波束模式的形状，还会影响天线增益。

3）天线倾角，即位于水平面下方的天线主波束和水平面之间的夹角被称为天线倾角。正/负角度分别对应下倾角和上倾角（Siomina 等人，2006）。

在电调下倾过程中，波形的主瓣、侧瓣和背瓣都是均匀调节的，但是使用机械下倾时，天线主瓣降低的同时其背瓣会增大。这种现象的发生是因为天线单元是直接指向地面的（Siomina 等人，2006），如图 5. 66 所示。

表 5. 5 用于天线分析的假设

参数	模型和数值
天线损耗模式（水平）	$A_H(\varphi) = -\min\left[12\left(\frac{\varphi}{\varphi_{3dB}}\right)^2, A_m\right]$
天线建模参数（水平）	HPBW 的默认值：$\varphi_{3dB} = 65°$， HPBW 的范围：[35 135]° 方位角转动范围：[-40 40]° HPBW 的粒度和标准步长：50°和 10° 方位角转动的粒度和标准步长：50°和 10° 最大衰减 $A_m = 25dB$
天线损耗模式（垂直）	$A_V(\theta) = -\min\left[12\left(\frac{\theta - \theta_{etilt}}{\theta_{3dB}}\right)^2, SLA_v\right]$
天线建模参数（垂直）	HBPW：$\theta_{3dB} = 8.5°$ 旁瓣衰减：SLA_v = 20dB RET 的范围：θ_{etilt} = [0°10°] RET 的粒度：0. 1°

（续）

参 数	模型和数值
天线的三维模式	$A(\varphi, \theta) = -\min\{-[A_H(\varphi) + A_V(\theta)], A_m\}$
天线增益	17dBi
天线配置	MIMO - off - 1 ×2MRC
总发射功率（单扇区）	46dBm - 10MHz 载波
发射电缆损耗	2dB
接收天线增益和衰落	0dB 和 0dB
接收噪声系数	9dB

表 5.6 用于分析的主要假设

参 数	模型和数值
系统频率	2000MHz
系统带宽	10MHz
PRB 数量	50
频率复用因子	1
激活态 UE 的总数量	1152
监测的小区数	2, 3, 4, 5, 6, 9, 10, 11, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 23, 24, 25, 30, 32
阴影 STD	8dB
阴影去相关	0.5（站址），1（扇区）
阴影去相关距离	50m
激活态 UE 的总数量	1152
UE 速率	10km/h
信道模型	典型城区（Typical Urban，TU）
UE 高度 h_{UE}	1.5m
eNB 天线高度 h_{eNB}	18.5m（平均），16m（最小），20m（最大）
每个 PRB 的热噪声	-121.4dBm
数据包调度器	资源平均分配
业务类型	满队列业务

5.4.2.2 天线参数的优化算法

这里选用的天线优化方法，先对来自测量和 eNB 侧计时器的不同的关键性能指标（Key Performance Indicators，KPI）进行收集，然后在小区中心位置作出 CCO 的决定，也就是 EM 或者 NM。因此，优化是基于不同小区 KPI 的分布而不需要特定终端

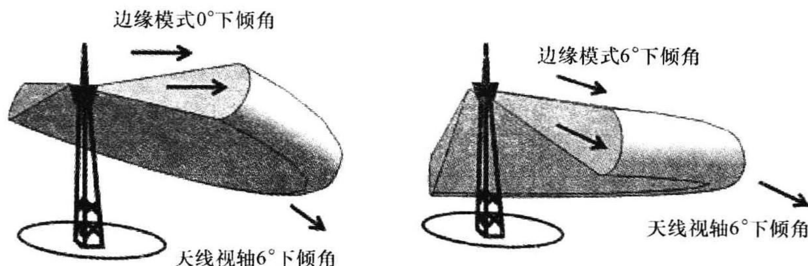


图 5.66　机械下倾（左）和电调下倾（右）

的测量报告。KPI 指标是测量当前网络性能和动向的一系列指标，如无线链路失败或掉话统计、信道状态指示（Channel State Indicator，CSI）、信道质量指示（Channel Quality Indicator，CQI）统计或者与切换相关的统计等。优化算法会优先把 KPI 用于网络行为的纠正。另一方面，只有当检测到网络中明显的问题时才会执行优化操作；通常是基于统计可靠的 KPI 数据去发现问题，并需要综合考虑覆盖与容量的性能目标。

一般使用一种基于场景学习（Case Based Learning，CBL）的算法来决定如何改变天线配置。CBL 算法在内存中存储之前场景产生的判决并且直接将这些场景用作新的情景（Uehara，1998；Langley 和 Iba，1993；Aha，1991）。需要指出的是，也可以使用其他不同算法。在最近出版的研究成果中（Islam 等人，2010；Wang 等人，2009），WCDMA 和 LTE 网络优化中分别采用了模拟退火算法和遗传算法（Genetic Algorithm，GA）。另一方面，在实际应用中上述方法的可行性还是个问号，主要原因在于 SON 有严格的优化限制。例如，单纯的启发式方法如模拟退火算法可能会减缓优化进程，因为该算法必须针对每一个小区分别进行优化处理，或者 GA 算法中的随机性在修改天线参数时可能会导致意想不到的后果。除了这些次要的危险和问题，SON 算法的开发所面临的主要挑战如下（Dottling 和 Viering，2009）：

1）包含输入数据的庞大的矢量和问题的根本原因，两者之间还没有清晰的映射，或是还不存在一个有希望改善网络情况的策略。

2）不完整的和部分的错误信息不足以支持网络作出判决。

3）由于需要巨大的参数空间，全面的搜索方法是不可能的。

4）由于存在对性能产生负面影响的风险，对正在运行的网络做反复试验是不允许的。

算法研究发现 CBL 算法适用于 SON 应用场景，原因在于其算法实施的低复杂度、在运营阶段对于优化操作人员的清晰度以及在少量练习样本和有限的功能场景下拥有的高精确性（Uehara，1998）。推荐的优化方法的核心就是一种 CBL 算法，称作 k 最近邻区（k - Nearest Neighbour，k - NN）算法，其中 k 等于 3（Uehara，1998；Langley 和 Iba，1993；Aha，1991）。当内存中存储了足够的训练样本时就可以使用 k - NN 算法。而内存中样本数太少时，会使用临时预定的决策准则进行分类，这是为了检测出天线是集中在小区边缘还是相反的情况。另外，图 5.67 描述了用于纠正错误的判决

并定义停止条件的启发式算法结构。当收集了无线网络性能统计后，要对所有的数字特征进行标准化以避免变化的 KPI 尺度造成偏置。

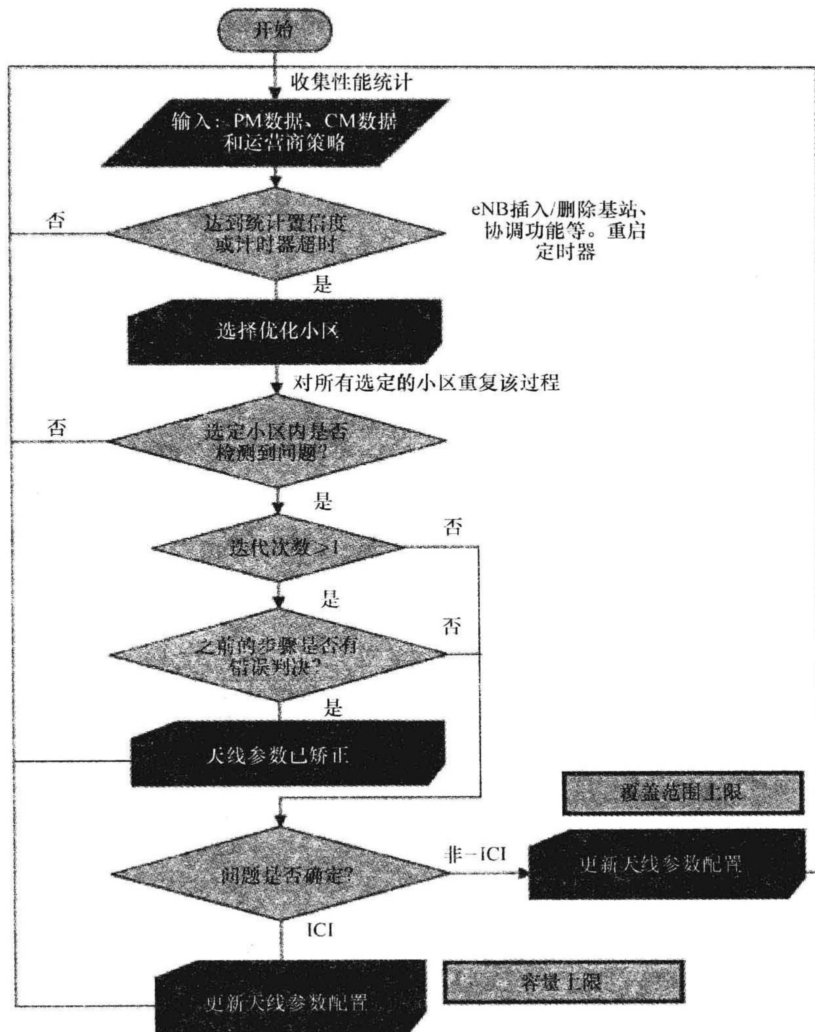


图 5.67　算法流程图

优化的每一步都会重新计算每个 KPI 指标的权重，该计算是通过使用留一法交叉验证技术（Alpaydin, 2010），对正确分类的 KPI 指标贡献度进行测量来实现的。KPI 权重受限于一个最小权重值，该最小值用来保持自优化的运行。

5.4.2.3　性能评估结果

网络性能可以优化到何种程度取决于所选择的配置及其优化算法。这里使用和 3G 网络相同的站址和天线倾斜角度，从而获得一个实际的但是次优化的网络性能。见表 5.7，优化的结果是网络中监测区域内的大部分小区的天线都进行了下倾调节，这是因为初始下倾角的设置考虑了 WCDMA 网络中的软切换增益（即宏小区分集），

但在 LTE 网络中使用的是硬切换。这也是为什么在遥控电调的自优化操作后，下倾角度增大同时重叠区域变小的主要原因。

表 5.7　自由化带来的天线参数变化

参数	进行了重配置的小区数	平均参数变化①	最小参数变化①	最大参数变化①
方位角	19/21	16.50°	5.00°	40.00°
遥控电调	17/21	2.45°	-3.50°	6.60°
水平 HPBW	17/21	-21.76°	-30.00°	20.00°

① 统计数据不包括保留初始配置的小区的信息。

图 5.68 和图 5.69 印证了之前对天线参数优化空间和遥控电调性能的研究（Yilmaz，2009）。可以看出优化后更显著的 SINR 增益发生在容量性能上，而不是在覆盖范围上。

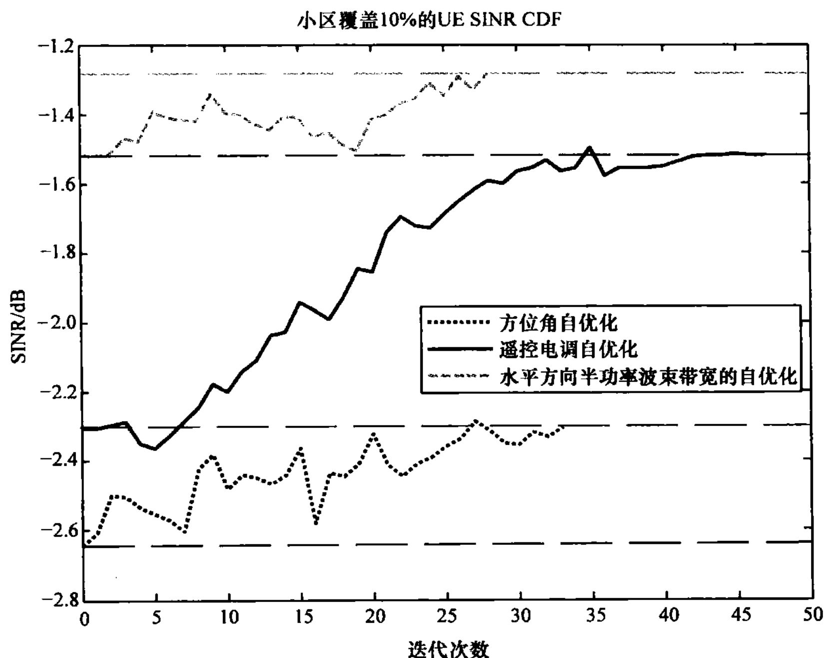


图 5.68　每次优化步长之后的 SINR CDF 曲线的第 10%（Yilmaz 等人，2011b）

如图 5.70 所示，方位角、下倾角和半功率波束宽度的自优化在小区容量上带来的平均增益分别为 4%、11% 和 7%。另一方面，由于变化的业务流量和传播条件，每个小区的容量增益水平也不尽相同。并且值得注意的是，为了观察容量优化，使用的方法是降低天线参数未发生改变的小区之间的干扰。

在图 5.71 中可以看到，掉话数和无线链路失败的次数显著地下降了，但并不是一直持续下降，造成这样的原因是网络中面积较大的小区占用了非监测小区内的噪声受限区域。观察到另外一个有价值的结果是，当波束狭窄时，通过增加天线增益来进行水平 HPBW 的优化，以此来给无线链路性能提供最大的增益。

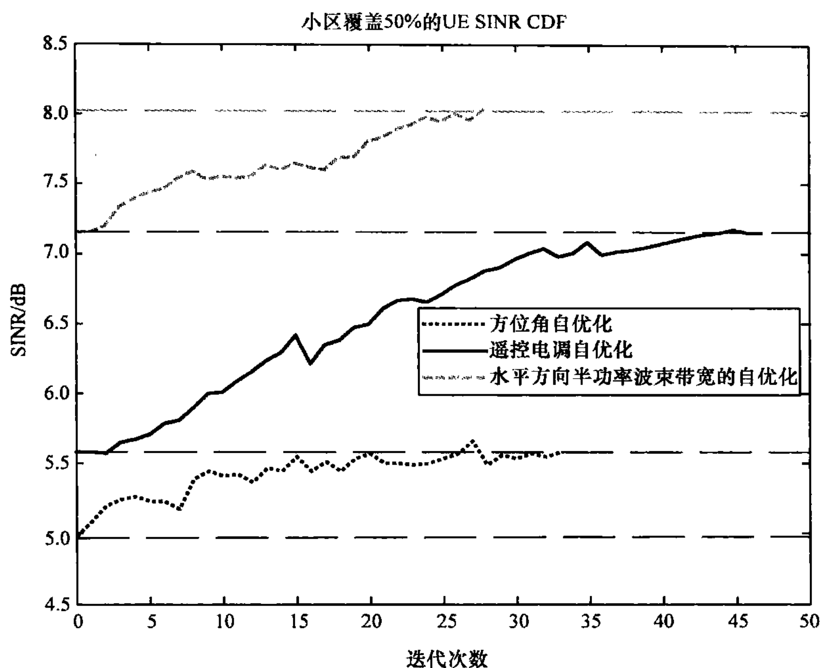


图5.69　每次优化步长之后的SINR CDF曲线的第50%（Yilmaz等人，2011b）

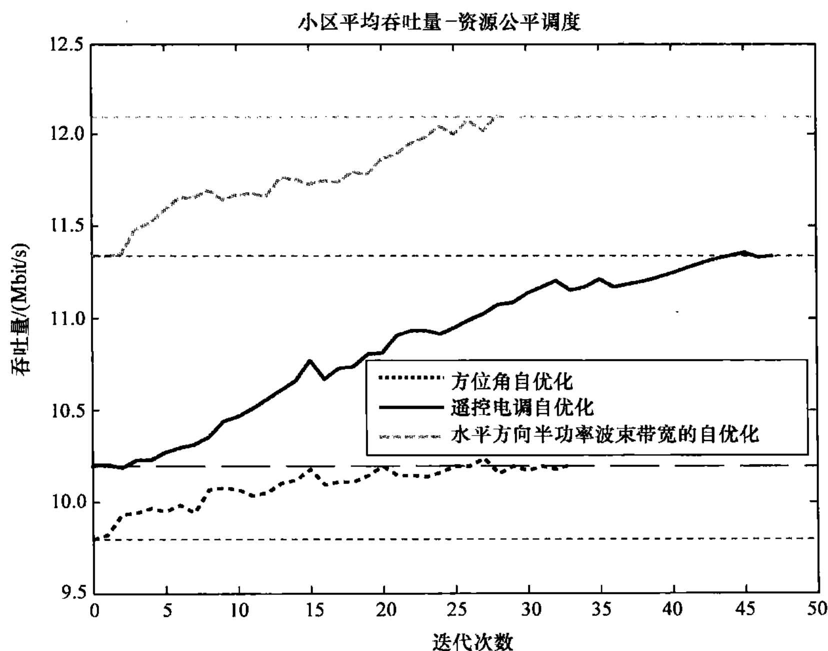


图5.70　平均小区吞吐量（Yilmaz等人，2011b）

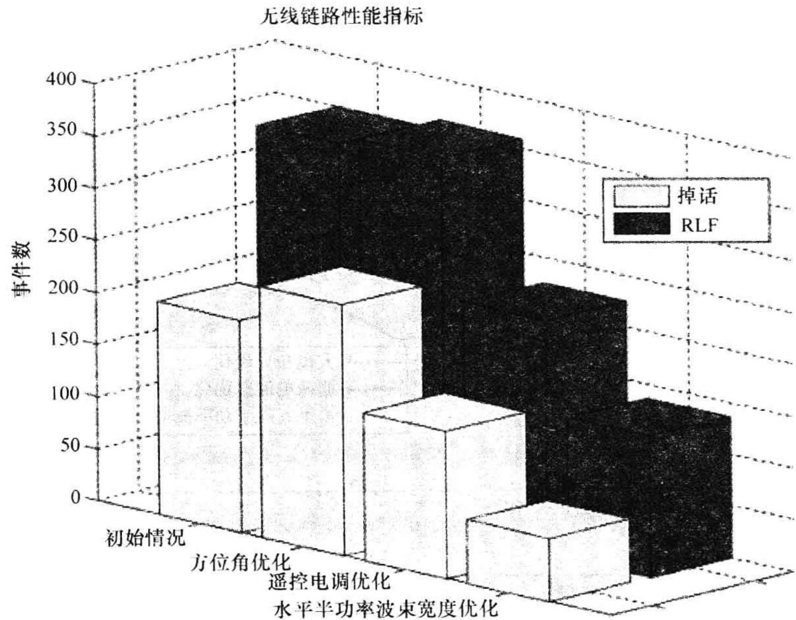


图 5.71　无线链路鲁棒性

如图 5.72 所示，切换期间服务质量的改善是与覆盖优化同时进行的。因此，在覆盖优化的场景下，可以使用较宽松的切换滞后量。

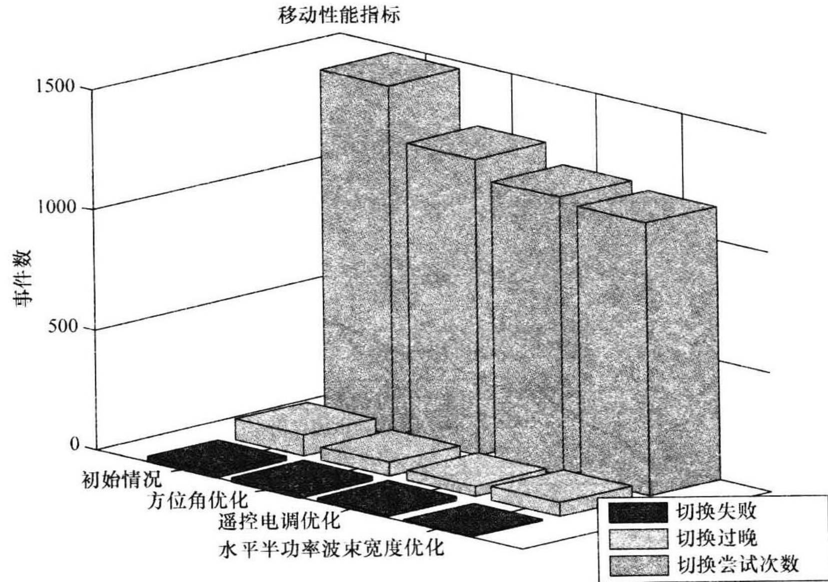


图 5.72　移动鲁棒性

进一步的移动负载均衡会变得更加稳健，这是因为特定小区偏移量（Cell Individual Offsets，CIO）可以进一步灵活配置。

5.4.3 带传输功率的CCO

在密集的网络中，基站传输功率优化通过避免过多的小区间干扰，从而可以获CCO技术增益。然而，功率优化会面临一定的挑战，比如放大器在长期工作过程中发生的变化、在切换区域发生无法预计的变化等。对于切换而言，功率优化存在一定问题。主要的原因是由于接收功率的变化不仅发生在小区的特定区域，而且还会影响到小区的其他部分，也就是说它会影响整个服务区域。

在LTE下行链路，当功率优化的概率变得有限时通常会使用全功率进行传输。在运营商使用低于最大功率发送的情况下，功率优化可以用于优化覆盖范围。通过降低功率，就可以达到降低干扰和节能的目的，并且参考信号功率的优化可以用来清除导频污染。

功率优化可以与天线的优化同时进行（见图5.73），但是两种机制会造成相似的影响。因此，功率和天线的优化需要协调进行，否则两者可能会互相干扰，甚至给网络优化带来负面的结果（比照9.2.6节的例子）。

在3GPP TS32.522（2011）中为SON策略定义了集成参考点（Integration Reference Point，IRP）。

IPR可以在平均功率和最大功率进行传输，这使得网络能够监控CCO功能在区域级管理层面的执行情况，或者为网络级管理的层面的CCO功能提供输入数据。

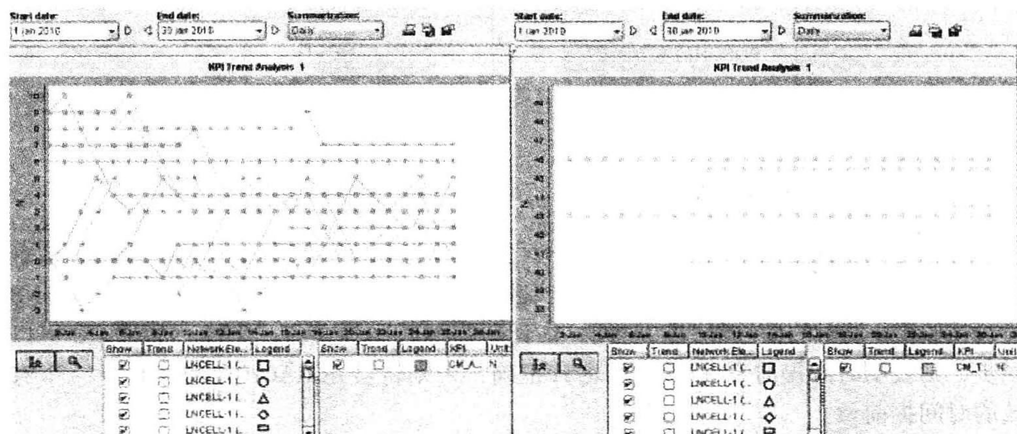


图5.73 RET（左）与TX（右）功率优化示意

（由于两种算法的相关操作，TX功率几乎没有发生变化）

5.5 随机接入信道RACH的优化

5.5.1 概述

为了能在任意的小区半径大小下为UE提供足够多随机接入的机会，需要对随机接入信道（RACH）进行精确配置。另外，需要根据小区负荷和物理环境对RACH进行适当优化。

首先对 RACH 信道和相关随机接入传输进行简要地阐述，相关技术细节可以参考 LTE 技术规范书，如 LTE 无线接入网相关说明可参考 Holma 和 Toskala 相关研究（2011）。不同目的下的随机接入过程可参考（3GPP TS36.300，2011），其包括：

1）从 RRC_ IDLE 状态的初始化接入；

2）RRC 连接重新建立过程；

3）RRC_ CONNECTED 状态下，接收上行数据需要请求随机接入过程[⊖]；

4）切换；

5）RRC_ CONNECTED 状态下，接收下行数据需要请求随机接入过程[⊖]；

6）RRC_ CONNECTED 状态下，进行定位需要请求随机接入过程[⊖]。

随机接入过程分为竞争和非竞争两种方式，如图 5.74 所示。上面列出的最后 3 个目的随机接入过程即属于非竞争方式，用于 eNB 发送专用前导序列。

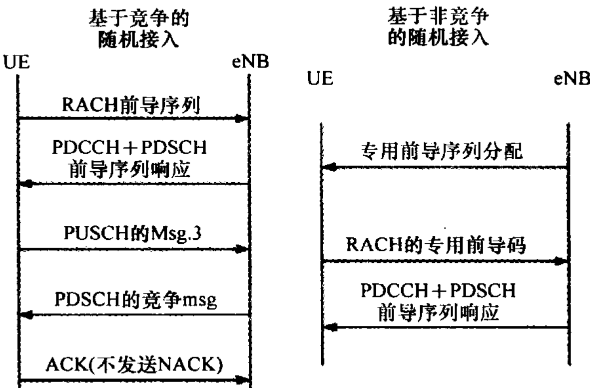


图 5.74 基于竞争和非竞争的随机接入过程

为了启动接入过程，在发送前导序列之前 UE 会进行下行同步并且读取系统信息（SIB 2）。UE 此时并不知晓与 eNB 的距离和时间提前量（Timing Advance，TA）。eNB 通过接收 UE 发射的信号经过的时间，估计所需的时间提前量（TA）。如果 UE 可以同步，则表明时间提前量（TA）的估计正确，否则将会在 RACH 过程中建立一个有效的时间提前量。

基于竞争接入的情况下，UE 选择一个前导码并且在可用子帧上传输。基于相关性，eNB 可以检测到接入并计算 UE 传输的定时。eNB 反馈该前导码并在同时确定时间提前量。在调度资源上的信息需要调换，而且网络分配临时的 C－RNTI 给 UE。UE 将携带 ID 的 Message3 发送给 eNB，其中 ID 的类型取决于 UE 目前的状态。在 UE 处于空闲状态时必须提供非接入状态非接入层（NAS）信息；在其他状态时，将给出接入层（AS）ID，即 C－RNTI。最终，网络完成竞争接入的判决，eNB 通过 ID 识别出 UE。

对于基于非竞争的接入不存在冲突，如在进行切换时，目标 eNB 生成前导序列

⊖ 注意，在进行上行数据发送时，如果 UE 上行非同步和/或未分配调度请求资源（Scheduling request，SR），则需要采用随机接入过程。

并且由源 eNB 发送给 UE，这是 UE 暂时专用的。在这种方式下不需要网络进行竞争的判决，因为为一个 UE 分配的前导序列无法被其他 UE 使用。

一般的上/下行传输发生在随机接入过程完全完成之后。每个小区共有 64 个前导序列，并且所有的前导码依照其指示的所需资源长度进行分组。其中一些前导码预留给非竞争接入用户。

5.5.2 物理随机接入信道的 PRACH 配置

RACH 发送的前导码映射在随机接入物理信道（Physical Random Access CHannel，PRACH）中。PRACH 资源在 1、2 或 3 个子帧中占用时频资源栅格并占用 6 个资源块（RB）的带宽。带宽的大小保持不变，小区带宽内的 6 个 RB 的准确位置通过 prach - FreqOffest 参数给出。3GPP TS36.211 中定义的前导码格式决定了 PRACH 信道占用的不同子帧个数。表 5.8 总结了 FDD 前导码格式和对应的最大小区半径范围。

格式 2 和格式 3 中，将包含 800μs 序列的前导码发送 2 次（因此持续时间变为原来的两倍），其将 eNB 接收能量提高了 3dB。

表 5.8 FDD 前导码格式及对应的最大小区覆盖面积

前导码格式	总持续时间/ms（子帧）	CP/μs	前导序列长度/μs	保护时间/μs	最大小区半径/km
0	1	103.1	800.0	96.9	14.5
1	2	684.4	800.0	515.6	77.3
2	2	203.1	1600.0	196.9	29.5
3	3	684.4	1600.0	715.6	101.9

PRACH 配置指示决定前导码格式、单位时间内 PRACH 资源数（“接入时隙”）及其准确的起始时间。

PRACH 配置指示接入时隙出现的频率和总容量具有较大的配置范围。其最小容量为每帧中 1/2 个时隙（即每两帧配置一个接入时隙）。前导码格式 0 具有最大容量，即每帧 10 个接入时隙。前导码格式 1、格式 2 和格式 3 分别限制为每帧 5、5 和 3 个时隙。FDD 系统在单位时间内仅能存在最多一个 PRACH 时隙。前导码格式 4 用于 TDD 模式。TDD 系统中，给定时间区间中可包含不止一个接入时隙。

每个小区中总共有 64 个可用前导序列。前导序列由 Zadoff - Chu 根序列和其循环移位构成。全部根序列共 838 个。前导码是根据每个根序列生成的，而由每个根产生的前导码数量是由其所需的零相关区域决定的。这是由于时间上的不确定性，具体来说造成不确定性的原因主要是时延的大小和扩展。在正常移动速度下可以使用非限制集。小区半径达到大约 760m 时，所有前导序列是从一个单根序列中通过 64 循环位移生成的。在小区半径大于 58830m 时，每个根序列仅有一个循环移位，因此每个前导序列来自于不同的根序列。

在高速和衰落场景下，检测对多普勒频移是非常敏感的。因此，在 UE 处于高速状态下，需要通过利用约束条件以限制循环位移的使用，并通过高速标识参数

（true，false）进行发送。在小区内通过根序列指示（rootSequenceIndex）和不相关区域配置（zeroCorrelationZoneConfig），将根序列发送给 UE。由根序列指示（rootSequenceIndex）的取值可以得到最大根序列指示。所以这 3 个配置参数可以提供给 UE 足够多的关于 64 个可用前导序列的相关信息。

PRACH 资源是通过时间、频率、根序列和循环移位来定义的。在 PRACH 资源分配过程中，邻小区的需求也需要考虑在内。对于相同的 PRACH 资源，小区间利用足够长的复用距离来避免和减少错误检测随机接入的可能。

5.5.3　随机接入信道配置

如上所述，每个小区有 64 个不同的前导序列。这 64 个序列可以再细分为 3 个集合：

1）基于竞争（非专用前导码）组 A；

2）基于竞争（非专用前导码）组 B；

3）非竞争组（专用前导码）。

这 3 个子集的大小如下：基于竞争的前导码的数量（组 A 和组 B 的总和）在变量 numberOfRA - Preambles 中给出，具体数值可以选择 4、8、12、16、20、24、28、32、36、40、44、48、52、56、60、64。余下前导码字用于专用前导码。组 A 中码字的数量在 sizeOfRA - PreamblesGroupA 中给出，具体数值可以选择 4、8、12、16、20、24、28、32、36、40、44、48、52、56、60、64。如果具体数值未给出，则其可选前导码为基于竞争前导码的全集。

用于竞争处理组 B 前导码的情况如下：当组 B 不为空，并且发送信息量很大的 Message3（大于 Message Size GroupA/bit），实际路损小于路损阈值（PL_ THR）。

路损阈值（PL_ THR）定义为

$$\text{PL_ THE} = P_{\text{CMAX}} - P_{\text{O_ PRE}} - \Delta_{\text{PRE_ Msg3}} - P_{\text{offsetB}}$$

式中　P_{CMAX}——UE 最大功率（dBm）；

$P_{\text{O_ PRE}}$——前导码初始接收靶功率（dBm）；

$\Delta_{\text{PRE_ Msg3}}$——Δ 前导码 Message3（dB）；

P_{offsetB}——message 功率补偿组 B（dB）。

当 UE 检测到没有响应时，前导码需要进行多次传输。为了成功地传输前导码，UE 需要逐步提高发射功率，如图 5.75 所示。第一次接入尝试的初始功率大小是由开环功率控制决定的（3GPP TS36.213，2011），具体计算如下：

$$P_{\text{PRACH}} = \min\ (P_{\text{CMAX}},\ \text{preambleInitialReceivedTargetPower} + PL)$$

功率增加的步长由功率进阶值［powerRampingStep（dB）］决定。

preambleTransMax 定义为最大尝试接入次数。为了检测到来自 eNB 的响应，UE 需要在每个子帧的随机接入响应窗口（ra - Response Window Size）间隔中监听 PDCCH。此时间间隔在前导序列发送后的第 3 个子帧开始。需要注意的是，eNB 响应包括了补偿指示（0.960ms），这是为了推迟和随机分配后续的尝试接入。

mac - ContentionResolutionTimer/subframes 用于监听随机接入过程的最后一个阶段

（3GPP TS36.321，2011）。Message3 中可能包含 HARQ 信息。HARQ 最大传输次数根据其中的 maxHARQ－Msg3Tx 确定。

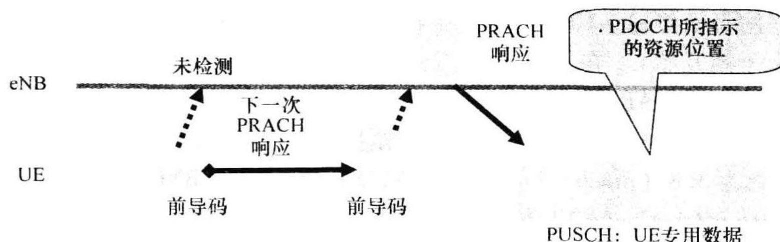


图 5.75　RA 过程（物理层过程）

5.5.4　RACH/PRACH 配置实例

RACH/PRACH 设置在系统信息 SIB2 中广播（3GPP TS36.331，2011）。

下面给出在系统广播消息中与 RACH 相关的参数配置：

1）RA 前导码数：40。
2）RA 前导码组 A 大小：28。
3）组 A 信息大小：144。
4）B 组功率补偿信息：10dB。
5）功率增加步长：2dB。
6）前导码初始接收靶功率：90dBm。
7）前导码尝试接入的次数：5。
8）RA 响应窗口大小：sf10。
9）MAC 层竞争判决定时器 sf64。
10）HARQ 最大传输次数 Msg3Tx 3。
11）根序列指示 12。
12）PRACH 配置指示 4。
13）高速标识 FALSE。
14）不相关区域配置 12。
15）PRACH 频率补偿 3。
16）参考信号功率 20dBm。
17）DeltaPreambleMsg3 消息 1dB。

在这个实例中为基于竞争的随机接入保留了 40 个前导码。对于较小信息传输使用前导码组 A。组 B 包含 40－28＝12 个前导码。当需要发送的比特数超过 144 并且路损小于 PL _ THR＝23dBm－（－90dBm）－1dB－10dB＝102dB 时（假设 UE 最大发射功率为 23dBm），可采用组 B 中的 preamble 前导码。

初始化前导码功率为－90dBm 加上测量的和高层过滤的路径损耗（dB），且每次重传时，发射功率增加 2dB。

在 UE 不为其最大发射功率所限制的情况下，最多允许 5 个前导码同时进行传

输，如果在5次尝试进行随机接入后依然没有 RA 响应，则会取消操作并检测失败。

前导码的每次传输，UE 在10个子帧中监测 PDCCH 上的响应（从前导码结束后的第3个子帧开始）。在 Message3 发送之后，竞争性接入将会在64个子帧内完成。配置至多3次 HARQ 传输。PRACH - ConfigIndex 4 的设置决定了前导码格式0（长度为1ms）及 PRACH 的位置：每个子帧提供1个接入时隙，每10ms一个时隙。使用的 RB 数为3.8（prach - FreqOffset 3），the lower 0.2 BXC 极可能用于 PUCCH。由 zeroCorrelationZoneConfig 12 参数遵照循环移位分离为119（见 3GPP TS36.211，2011），这将会使每个根序列生成7个前导码。小区设置需要的10个根序列：逻辑指示12.21，由 rootSequenceIndex 12 开始。referenceSignalPower dBm 20 参数用于路径损耗的估算。

5.5.5　随机接入性能

对于 PRACH 接收机性能的需求在 3GPP TS36.104（2011）和 3GPP TS36.141（2010）中给出：前导码误报警的概率应小于或等于0.1%，并且前导码正确检测的概率应大于99%。因此，检测遗漏的概率应小于或等于1%。这些随机接入要求需要一定传输条件来保证（如 SINR 等）。

在实际部署场景中，环境的变化如信道条件、UE 速率和 SINR 取决于发射功率、负载、几何构型等。因此，非常有必要对参数进行调节。尤其是功率调整对于随机接入性能有很大影响。这需要对随机接入失败率、随机接入持续时间和 PRACH 传输引起的干扰这三方面做折中操作。需要注意的是，PRACH 引起的干扰对 LTE 上行，如 SC - FDMA 和正交操作的影响并不是很严重，但是前导码低功率发射可能对降低小区间干扰有益。与随机接入相关的参数有：powerRampingStep/dB（功率增加步长/dB）、preambleInitialReceivedTarget - Power/dBm（前导码初始接收目标功率/dBm）、preambleTransMax（最大随机接入次数）。eNB 请求 UE 上报其发送前导码的数量，并且可用作 eNB 在做 RACH 优化的 SON 算法的输入参量。

另一个导致上行随机接入性能恶化的原因是过大的 RACH 负载。基于竞争的随机接入过程遵守带有固有冲突风险的分段式 Aloha 协议。这里讲的冲突是指同一前导序列在同一小区中的重合。由于多个 UE 同时完成随机选择的操作，这就有可能出现两个或两个以上的 UE 发送相同的前导码的现象。发生冲突时，网络最多可以正确处理一个 UE 的上行接入请求。冲突发生的几率是随着负载的增加而增大的，并且决定着基于分段式 Aloha 协议的接入系统的吞吐量：

$$Y = A\mathrm{e}^{-A/N}$$

式中　Y——携带业务量/1；

A——提供的业务量/1；

N——并行信道的数量/1（即可用序列的数量）。

注意，A 和 N 值基于最大的信道容量做归一化。对于无负载系统（$A \to 0$ 时），冲突的概率同样→0，此时 $Y = A$。对于过载系统 $A \to \mathrm{inf}$，即冲突避免的几率为零并且

$Y \to 0$（假设不能检测到冲突）。

应当指出的是，冲突并不意味着随机接入失败，preambleTransMax 的设置就是为了保证每个 UE 成功发送自己的前导码。此外，参与冲突的多个 UE 中仅有一个 UE 有可能得到解码。这样做最大的弊端在于过多地重复传输造成较大的时延以及系统干扰的增加。为了抵消这些影响，可以增加 PRACH 资源的数量。不过这还需要权衡 PUSCH 容量的损失。需要注意的是，可以将 PUSCH 调度在 PRACH 相同的时频资源上，不过这样会在相应的 RB 资源上造成较大的干扰。

为了测量与冲突事件相关的网络性能，eNB 仅需测量 Y 值、PRACH 承载的数据量，利用上述计算对冲突概率进行估算。另外，可以要求 UE 上报其 MAC 层检测到的冲突事件。

上述提及的相关 PRACH 性能可以在 eNB 侧进行评估并做出调整。而在考虑 PRACH 资源分配的优化时，情况则会不同。正如前面提到的，邻小区间的 PRACH 资源应该分开，具体可以通过时间、频率或者分配不同的根序列来实现。确定的时间分隔仅在小区间同步的情况下是可能的，如同一 eNB 下的不同扇区或 TDD 模式。基于频率或不同根序列的分离操作可以在任何情况下使用。

在进行优化的过程中，仅局限于本地区域内显然是不够的，还应考虑整个网络的需求。为了支持分布式 SON，eNB 之间应允许交换相关优化参数（见下述内容）。

5.5.6 自优化体系

为了实现 RACH 的自动化管理，以应对不断变化的网络情况，从而不断地优化 RACH 配置，RACH SON 优化算法由两个独立的机制构成：

1）UE 上报信息。

2）eNB 之间信息交互。

作为 SON 的一类应用实例，RACH 优化是指 eNB 根据网络情况的变化不断调整 RACH 的配置。为了闭合控制回路以接收反馈，eNB 可以在其所在的一个小区内向任何一个刚刚建立连接的 UE 请求 RACH 的性能信息。为了协调相邻小区间的 RACH 配置，eNB 可以通过 X2 接口提供本小区的 RACH 配置结果，并随时进行更新。这种机制具体描述如图 5.76 所示。

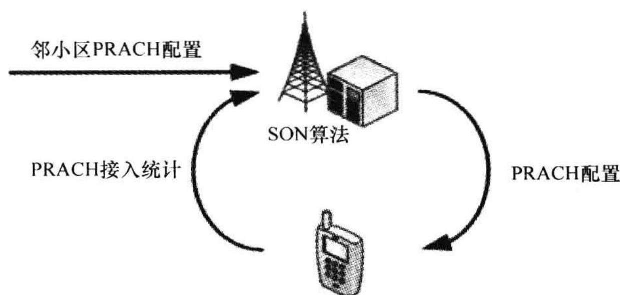


图 5.76 RACH 优化环

5.5.7 UE 上报信息

UE 上报属于 RRC 规范的一部分，这种机制要求 UE 上报在其完成 RACH 过程之前 MAC 层发出的前导码数量。此外，如果 MAC 在任意前导码中检测到冲突，就需要在上报信息中指出冲突的存在（冲突标识设置为“true”）。为了避免将信息上报不支持 RACH SON 优化的 eNB，信息上报定义为一个独立的过程。如果 eNB 希望得到 RACH 的统计信息，则 UE 必须向 eNB 提供相关信息。

在提供 UE 上报信息的情况下，就有可能在一个给定时间段中进行统计分析得到接入概率。因为接入概率对 QoS（如时延）有直接的影响，所以这个概率可以作为优化准则。基于竞争的随机接入（CBRA）和基于非竞争随机接入（NCBRA）（在 m 次尝试后能够正确接入的概率见式（5.1）和式（5.2）。其中，*DMP* 为遗漏检测概率（DMP）；*CP* 为 CBRA 的冲突概率；*BP* 为 NCBRA 的阻塞概率（Amirijoo 等人，2009）。

$$AP_{\mathrm{CBRA},m} = 1 - \prod_{i=1}^{m}(DMP_{\mathrm{CBRA},i} + (1 - DMP_{\mathrm{CBRA},i}) \cdot CP) \tag{5.1}$$

$$AP_{\mathrm{NCBRA},m} = 1 - \prod_{i=1}^{m}(DMP_{\mathrm{NCBRA},i} + (1 - DMP_{\mathrm{NCBRA},i}) \cdot BP) \tag{5.2}$$

对 DMP 和 AP 性能指标的监测是通过在 eNB 的本地 SON 来完成的，基于此可以完成发射功率参数（如初始功率和功率增加步长，Amirijoo 等人，2009）、RACH 前导码的分配周期和前导码分裂参数的优化（Yilmaz 等人，2011a）。如果 RACH 性能可以保持在运营商设定的目标之上（见图 5.77），那么 PUSCCH 容量同样可以扩展为图 5.78 中所示的虚载指示标准化的容量需求，以达到服务满意度的要求。

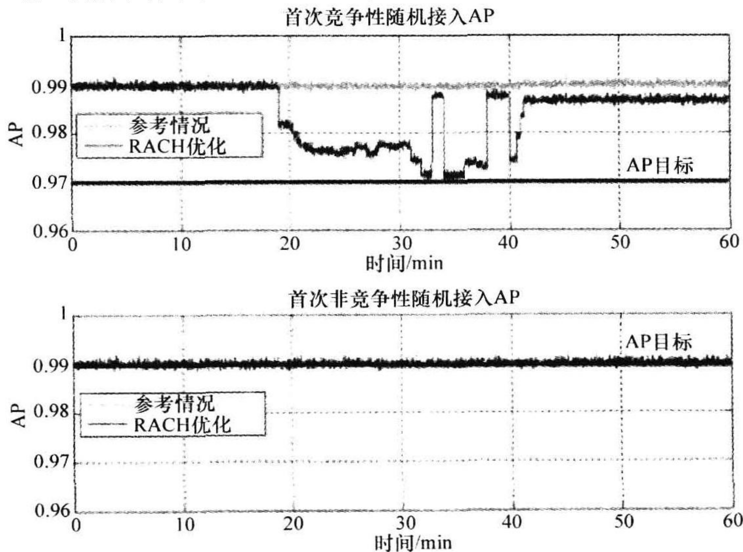


图 5.77　首次尝试的接入概率（Yilmaz 等人，2011a，2011 IEEE 准许转载）

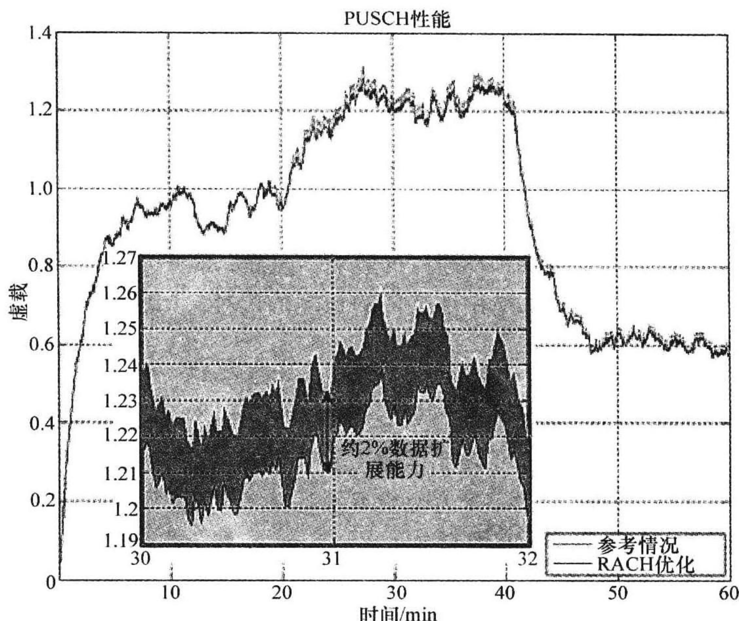


图5.78 PUSCH性能优化（Yilmaz等人，2011a，2011 IEEE准许转载）

5.5.8 eNB间通信

上述介绍的上报机制可以实现eNB对RACH接入性能的监测。由于其他小区中与本小区相冲突的RACH配置可能也会影响接入性能，因此基于静态协作的网络规划是不够的。在本地配置的情况下可以考虑进行动态调整。为了在SON算法中考虑当前相邻eNB设置信息，当相邻小区配置发生变化时，其RACH配置可通过X2接口通知当前小区。这些情况下，X2接口的信令交互包括以下信息：

1）根序列指示。

2）不相关区域配置。

3）高速标识。

4）PRACH频率补偿。

5）PRACH配置指示（仅有TDD模式）。

这些参数已在3GPP TS36.211（2011）中定义，下面将简要介绍其具体定义及相关RACH优化应用。

1. 根序列指示

PRACH使用Zadoff－Chu序列来产生前导码。由于ZC序列具有相对较低的峰均功率比（PAPR），使得在终端放大器的实现变得更容易。此序列是由一组根序列生成的。

LTE的根序列分为838个逻辑根序列，并且每个小区会广播其选用的根序列指示。相邻eNB则利用这些信息来避免调度重复序列。

2. 不相关区域配置

基于选择的根序列指示，前导码通过使用给定的不相关区域和循环移位来产生。不相关区域是为了在 UE 时间不确定和存在传输延时保证生成序列的正交性。不相关区域的取值取决于小区的特定条件，比如小区大小和同步源，其取值在每个小区中进行广播。

3. 高速标识

循环相关系数会受到终端移动速度的影响。因此，对于承载着高速移动 UE 的小区，会进一步限制其不相关区域循环移位的长度的选择。UE 根据系统广播标识判定在给定小区是否应该限制长度。

4. PRACH 频率补偿

如第 2 章所述，小区频谱资源被划分为多个 PRB。小区通知所有终端可以用于 RACH 接入的 PRB。FDD 模式可以使用频率补偿技术，并且其取值在每个小区中广播。相邻 eNB 可以利用这个信息来避免给 RACH 接入调度相同的 PRB。

5. PRACH 配置指示（仅 TDD 模式）

TDD 模式下，频率补偿不能仅依据 PRB 数量进行分配，还需要考虑 PRACH 配置指示。每个小区都需要对已用的 PRACH 格式指示进行广播，但为了取得 PRACH 占用的 PRB，PRACH 配置指示仅在 TDD 模式下工作的小区需要。

5.6 RRM 和 SON（干扰协调，P0 参数优化）

无线资源管理（Radio Resource Management，RRM）和 SON 两者之间的区别并不是十分严格。网络参数或行为是否属于 RRM 或者 SON 主要取决于相关的动态时间尺度。如果某一行为或参数是快速变化的，如基于毫秒级，那么它就属于 RRM。但是，如果网络行为要每隔几秒或者更长的时间才能完成的话，我们就将其归为 SON。

然而，很多 RRM 算法中所包含的参数可以通过 SON 的算法以较低的速率来完成更新。本节我们将给出该种场景下的一些实例。首先在 5.6.1 节中介绍干扰协调，随后在 5.6.2 节中介绍上行功率控制过程中使用的 P0 参数的优化。

5.6.1 干扰协调

干扰管理（ICIC，即小区间干扰协调）的基础就是对地理位置上相邻小区使用的无线资源进行协调。这些技术的目的在于控制小区间的干扰并改善小区边缘的 SNR。典型的策略是从无线资源角度出发，采用智能的方式对用户进行分组。还可以给特定分组的用户预留 PRB 资源或是使用不同的功率协调技术来进一步增强性能。图 5.79 给出了 ICIC 干扰协调方法的例子：基站会将小区边缘用户调度到黑色区域的频段资源上，而相邻小区基站则不会在相同的频段资源上调度浅灰色区域内的用户。因此，该频段上小区间干扰被控制在较低的程度。

ICIC 可以在上/下行的数据信道（PDSCH 和 PUSCH）或上行的控制信道（PUCCH）上进行。但是，在下行控制信道（PDCCH）上无法进行 ICIC 操作，这是

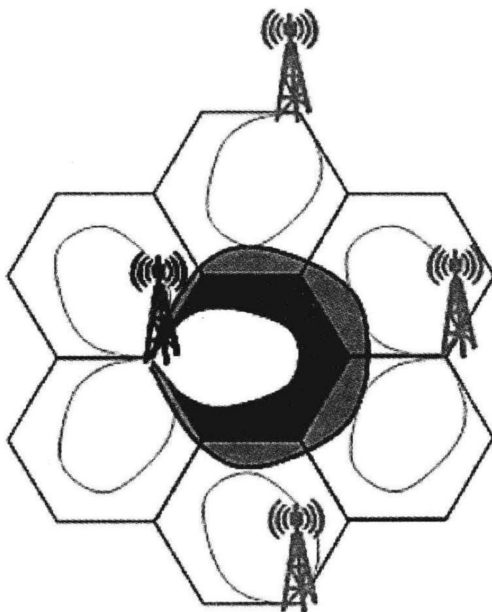


图5.79 小区间干扰协调示例

因为下行控制信道上的参数被扩展到了全频段和多个OFDM符号上。

ICIC协调方案有动态、静态和半静态三种。动态方案主要使用小区间的信令来频繁地调整参数。对于不同站址的小区需要X2接口的信令（见图5.80）。静态ICIC方案中的参数不会发生变化，半静态方案则是基于小区之间的信令对参数做较慢的自适应。

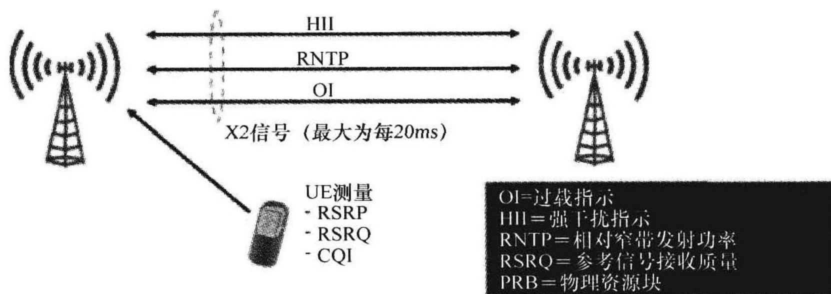


图5.80 小区间干扰协调X2接口信令

为了支持不同站址之间的动态ICIC方案和相关参数的调整，R8（3GPP TS36.423，2011）对以下X2接口信令进行了标准化。包括两类参数：

1. 用于主动协调的调度通知

1）HII（High Interference Indicator，强干扰指示）以比特映射集的方式发送。该映射集中每一个对应位置的比特都代表一个PRB（第一个比特表示PRB0，以此类

推），比特值为“1”表示“对干扰的灵敏度高”而“0”表示“对干扰的灵敏度低”。更多细节参见 3GPP TS36.423（2011）。

2）RNTP（Relative Narrowband Transmit Power，相对窄带发射功率）的映射集中每个对应位置上的比特都代表一个 nPRB（第一个比特表示 PRB0，以此类推），比特值为“0”表示“发射功率没有超过 RNTP 的阈值”而“1”表示“发射功率超过阈值”。更多细节参见 3GPP TS36.423（2011）。

2. 用于反馈协调的指示

OI（Overload Indicator，过载指示）信令针对每个 PRB 提供一个干扰过载的报告。

由于 X2 接口的信令传输存在一定的时延，所以干扰协调无法实现即时调整。此外，该信令会占用 X2 接口的带宽（取决于信令的频率）。

为了说明 ICIC 的相关性能，这里给出一些上行链路的分析结果。因为 UE 在上行链路功率受限，同时干扰也最大，由于有限的传输功率 UE 无法使用大量的 PRB 资源，因此在上行链路上采用 ICIC 的方案进行干扰消除效果较为明显。

在上行链路，UE 的传输功率是由开环功率控制决定的。3GPP 协议中规定如下上行发射功率调整方式：

$$P_{\text{PUSCH}} = \min\{P_{\text{MAX}}, 10.\log_{10}(M) + P_0 + \alpha.PL + \Delta_{\text{MCS}} + f(\Delta_{\text{PUSCH}})\}$$

式中　P_{MAX}——UE 的最大传输功率；

M——网络分配的 RB 数；

P_0——包含 UE 专属的功率和广播的功率；

α——小区特定的路径损耗因子；

PL——UE 基于参考符号的传输功率评估出的下行路径损耗；

Δ_{MCS}——UE 特定的参数，取决于所选择的调制编码方式（MCS）；

$f(\Delta_{\text{PUSCH}})$——UE 特定的修正值，即 TPC，在累计闭环功率控制命令的情况下 $\Delta_{\text{PUSCH}} = [-1; 0; 1; 3]$ dB。

上行链路的干扰协调可以通过以下方式实现：

1）与 GSM 相同，将频谱分段并进行频率复用。虽然会降低干扰但是会给小区和用户性能带来负面影响，主要是该方法严重影响每个小区可用的 PRB 数量。

2）使用软频率复用模式，复用的这一部分带宽被称为首选频带，通过使用这种频率复用方式来协调多个小区之间对边缘用户的干扰。

3）基于 X2 接口的信令可以对可分配给小区边缘用户的 PRB 进行更新。此问题的关键在于如何确定用户的首选频段。

图 5.81 给出了主要的方案。

图 5.82 给出了采用上述算法网络能够达到的 95% 覆盖对应的归一化有效频谱效率。通过仿真结果可以看出，随着负荷比例的下降上行 ICIC 的增益变大。当负载较高时 ICIC 并没有明显的增益，然而当网络负荷为 25%（可用的 PRB 中有 25% 被使用）时使用 ICIC 方案可以将网络性能提升 22%。进一步地，通过调度所有处在高干扰频带范围内的 UE 能够获得最佳的上行 ICIC 性能，而且不需要依靠任何关于小区边

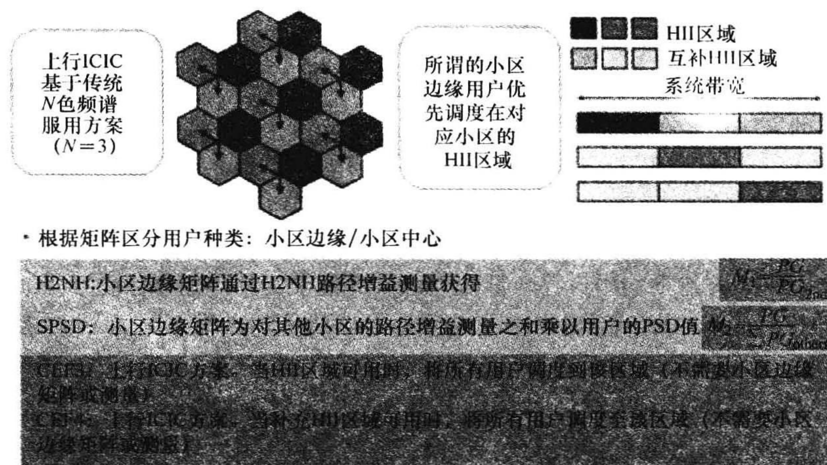


图 5.81　上行 ICIC

缘识别的 UE 测量。

需要指出的是上述分析结果采用比例公平调度方案，同时考虑了在首选频带和非首选频带上分别进行比例公平调度。

从上述分析可以看到，干扰协调可以获得的增益较小。在异构网络的场景下干扰协调可获得较高的增益。干扰协调与 SON 相关的部分主要是相邻小区首选频段的协调。为了完成干扰协调，可以使用基于 X2 信令的分布式协调或是集中的协调方式由中控单元决定相邻小区首选频段的选择。集中方式会利用规划工具的输入，来获得小区间的干扰耦合。

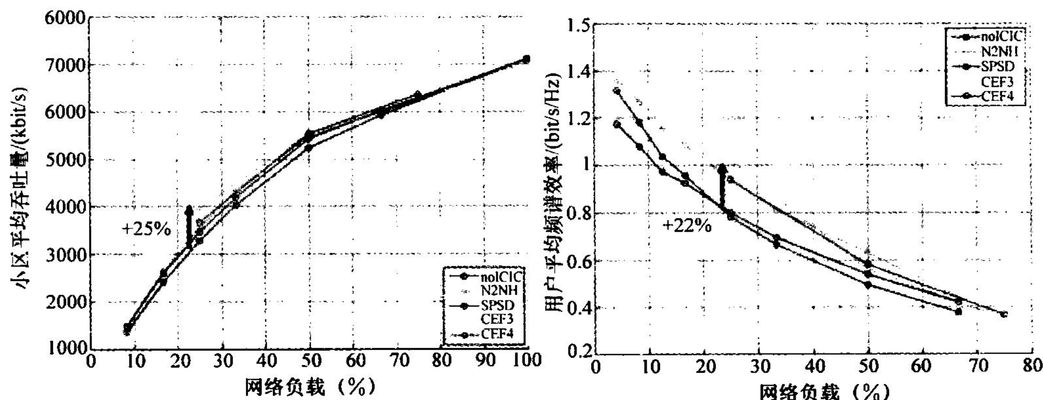


图 5.82　不同 ICIC 技术的频谱效率

5.6.2　P0 优化

LTE 的上行功率控制分为开环功控和闭环功控。前者是为了补偿路径损耗（包含

阴影衰落的）引起的接收信号的缓慢变化；后者是为了进一步调整用户传输功率以补偿传输中发生的错误和接收信号的快速变化，从而进一步地优化系统性能。相关修正和优化操作的实现由设备制造厂商决定。在一个给定的子帧里设置 UE 的上行传输功率 P_{PUSCH} 的方法已经在前一节中给出，即

$$P_{PUSCH} = \min\{P_{MAX},\ 10.\log_{10}(M) + P_0 + \alpha.PL + \Delta_{MCS} + f(\Delta_{PUSCH})\}$$

部分功率控制算法（Fractional Power Control，FPC）旨在部分性地补偿用户的路径损耗。这种算法对小区边缘用户造成的影响比小区中心用户大。覆盖范围（定义为业务时间段内 5% 的平均用户吞吐量）与容量（定义为平均的小区吞吐量）在不同 α 的值下的映射关系在图 5.83 中给出。图中每条曲线上的点为不同的 P_0 参数的对应值，其中两点之间的 P_0 只以 2dB 的步长值增大。在不同 P_0 参数值（[-108，-84，-64，-36] dBm）和 α（[1，0.8，0.6，0.4]）下可以看出在容量达到最大之前，覆盖性能已达到峰值。以上结果是在宏小区 3 场景中使用 6 个 RB 的固定传输带宽并且每个小区 10 个 UE 的情况下获得的。

图 5.83 给出了参考性能的情况并说明了吞吐量性能很大程度上取决于 P_0 的值。即使 P_0 值的设定有很小的变化也会给吞吐量性能带来明显的影响。

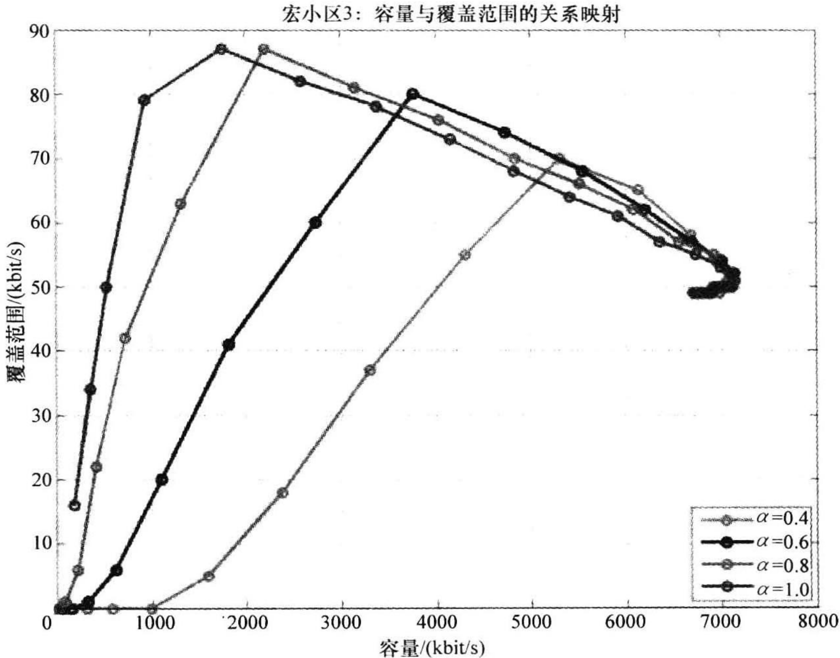


图 5.83　用于 FPC 的覆盖与容量宏小区 3 场景 6

Boussif 等人（2010）指出，最优的 P_0 值取决于系统的负荷，同时也与环境有关。尺寸较小的小区需要的 P_0 值与较大的小区也不同。对于设置网络中每一个小区的 P_0 参数，有以下 3 种可能的方案：

1）对所有的小区都配置一个固定的 P_0 值：该方法不需要网络规划，但是由于网络中的小区通常都不相同，该方法很难达到最佳的效果。

2）使用路径损耗信息：每个小区的路径损耗信息可以通过 UE 产生的 RSRP 测量报告获得。P_0 的设置可以参考以下公式：

$$P_0 = P_{MAX} - M\text{dB} - \alpha L@95\%$$

式中 P_{MAX}——UE 最大功率；

MdB——UE 平均使用的 PRB 的数量；

$L@95\%$——5% 的最差路径损耗，可以通过 RSRP 测量报告获得或来自网络规划工具。

该算法背后的思想是，使用这种算法则每一个小区中只有 5% 的用户会碰到功率饱和的情况。

3）优化 SINR：举例来说，该方法可以在每一个小区中寻找 5% 的最差 SINR，相关的成本在图 5.84 中给出。SINR 信息可以通过规划工具或是 UE 的测量报告（RSRQ）获得，然后使用一种启发式的搜索算法通过调整小区的 P_0 值来尝试优化成本函数。这里要注意的是，增大 P_0 可以改善该小区的 SINR，但同时会给其他小区带来更大的干扰。图 5.84 的成本函数示例中给出了 5% SINR 的下限和上限。在两个界限值之间，成本函数呈下降趋势。这种下降趋势的效果使得该算法会花大量的精力去改善 5% 的最差 SINR 值，也就是说，用户处在小区边缘会有最低的 SINR，因为其增益是最大的。

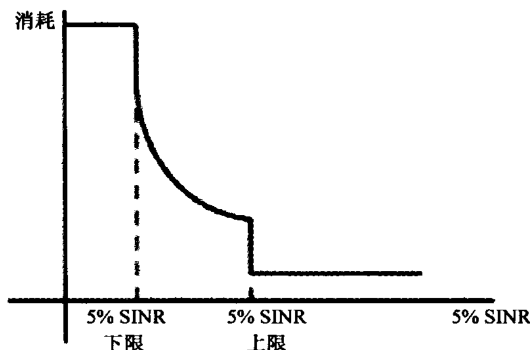


图 5.84 与 SINR 相关的成本函数

基于欧洲主要城市的 3G 网络路径损耗信息，使用仿真模拟器对上述三种方案做了离线评估（见图 5.85）。仿真中 P_0 选择了固定值 -66dBm，这是因为相比较其他 P_0 的固定值，-66dBm 有最好的性能。由图 5.85 可以看出，与固定 P_0 值的方法相比较，5% 最差 SINR 规则算法对性能较差的小区改善效果不明显；但是对于性能良好的小区，5% 最差 SINR 规则算法能提升小区边缘的 SINR。而对于提升较差的小区的性能，启发式搜索（HTS）树的算法是 3 种方法具有最优性能。

通过以上分析可以看出，尽管功率控制被看作 RRM 的功能，其也可以通过基于 SON 的算法来更新不同算法中的参数。

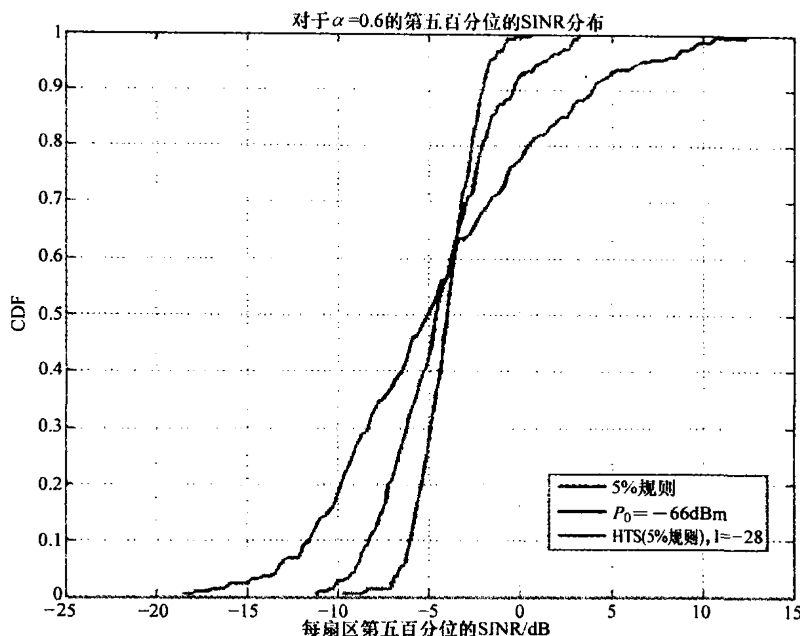


图 5.85 三种 P_0 优化方法的对比

参考文献

3GPP TR32.826 (2010) Technical Specification Group Services and System Aspects Telecommunication Management, *Study on Energy Savings Management (ESM)*, ver.10.0.0., Release 10, 30 March 2010. Available from http://www.3gpp.org/ftp/Specs/latest/Rel-10/32_series/32826-a00.zip [accessed 30 June 2011].

3GPP TR36.814 (2010) Technical Specification Group Radio Access Network (E-UTRA), *Further Advancements for E-UTRA Physical Layer Aspects*, ver.9.0.0., Release 9, 30 March 2010. Available from http://www.3gpp.org/ftp/Specs/latest/Rel-10/36_series/36814-900.zip [accessed 30 June 2011].

3GPP TS25.331 (2011) Technical Specification Group Radio Access Network, *Radio Resource Control (RRC) - Protocol Specification*, ver.10.4.0., Release 10, 1 July 2011. Available from http://www.3gpp.org/ftp/Specs/latest/Rel-10/25_series/25331-a40.zip [accessed 30 June 2011].

3GPP TS32.522 (2011) Technical Specification Group Services and System Aspects Telecommunication Management, *Self-Organizing Networks (SON) Policy Network Resource Model (NRM) Integration Reference Point (IRP): Information Service (IS)*, ver.10.2.0., Release 10, 17 June 2011. Available from http://www.3gpp.org/ftp/Specs/latest/Rel-10/32_series/32522-a20.zip [accessed 30 June 2011].

3GPP TS36.133 (2011) Technical Specification Group Radio Access Network (E-UTRA), *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Requirements for Support of Radio Resource Management*, ver.10.3.0, Release 10, 21 June 2011. Available from http://www.3gpp.org/ftp/Specs/latest/Rel-10/36_series/36133-a30.zip [accessed 30 June 2011].

3GPP TS35.304 (2011) Technical Specification Group Radio Access Network, *User Equipment (UE) Procedures in Idle Mode and Procedures for Cell Reselection in Connected Mode*, ver.10.1.0., Release 10, 24 June 2011. Available from http://www.3gpp.org/ftp/Specs/latest/Rel-10/25_series/25304-a10.zip [accessed 30 June 2011].

3GPP TS36.300 (2011) Technical Specification Group Radio Access Network. *E-UTRA and E-UTRAN Overall description, Stage 2*, ver.10.3.0., Release 10, 22 June 2011. Available from http://www.3gpp.org/ftp/Specs/latest/Rel-10/36_series/36300-a40.zip (accessed 30 June 2011).

3GPP TS36.211 (2011) Technical Specification Group Radio Access Network, *E-UTRA Physical Channels and*

Modulation, ver.10.2.0., Release 10, 22 June 2011. Available from http://www.3gpp.org/ftp/Specs/latest/Rel-10/36_series/36211-a20.zip (accessed 30 June 2011).

3GPP TS36.213 (2011) Technical Specification Group Radio Access Network, *E-UTRA Physical Layer Procedures*, ver.10.2.0., Release 10, 22 June 2011. Available from http://www.3gpp.org/ftp/Specs/latest/Rel-10/36_series/36213-a20.zip [accessed 30 June 2011].

3GPP TS36.104 (2011) Technical Specification Group Radio Access Network, *E-UTRA, Base Station (BS) Radio Transmission And Reception*, ver.10.3.0., Release 10, 20 June 2011. Available from http://www.3gpp.org/ftp/Specs/latest/Rel-10/36_series/36104-a30.zip [accessed 30 June 2011].

3GPP TS36.141 (2011) Technical Specification Group Radio Access Network, *E-UTRA Base Station (BS) Conformance Testing*, ver.10.3.0., Release 10, 20 June 2011. Available from http://www.3gpp.org/ftp/Specs/latest/Rel-10/36_series/36141-a30.zip [accessed 30 June 2011].

3GPP TS36.304 (2011) Technical Specification Group Radio Access Network, *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) procedures in idle mode*, ver.10.2.0, Release 10, 21 June 2011. Available from http://www.3gpp.org/ftp/Specs/latest/Rel-10/36_series/36304-a20.zip [accessed 30 June 2011]

3GPP TS36.321 (2011) Technical Specification Group Radio Access Network, *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC)*, ver.10.2.0, Release 10, 21 June 2011, Available from http://www.3gpp.org/ftp/Specs/latest/Rel-10/36_series/36321-a20.zip [accessed 30 June 2011].

3GPP TS36.331 (2011) Technical Specification Group Radio Access Network, *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC) - Protocol specification*, ver.10.2.0., Release 10, 24 June 2011. Available from http://www.3gpp.org/ftp/Specs/latest/Rel-10/36_series/36331-a20.zip [accessed 30 June 2011].

3GPP TS36.423 (2011) Technical Specification Group Radio Access Network, *E-UTRAN X2 Application Protocol (X2AP)*, ver.9.6.0., Release 10, 24 June 2011. Available from http://www.3gpp.org/ftp/Specs/latest/Rel-10/36_series/36423-a20.zip [accessed 30 June 2011].

3GPP TR36.927 (2011) Technical Specification Group Radio Access Network, *Potential Solutions for Energy Saving for E-UTRAN*, ver.10.0.0., Release 10, 24 June 2011. Available from http://www.3gpp.org/ftp/Specs/latest/Rel-10/36_series/36927-a00.zip [accessed 30 June 2011].

3GPP TR36.942 (2010) Technical Specification Group Radio Access Network, *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) System Scenarios*, ver.10.2.0., Release 10, 6 January 2011. Available from http://www.3gpp.org/ftp/Specs/latest/Rel-10/36_series/36942-a20.zip [accessed 30 June 2011].

Aha, D.W. (1991) Case-based learning algorithms. In Proceedings of Case-Based Reasoning Workshop, pp. 147–158.

Alpaydin, E. (2010) *Introduction to Machine Learning*, 2nd edn, The MIT Press, Massachusetts, pp. 486–489.

Amirijoo, M., Frenger, P., Gunnarsson, F. *et al.* (2009) Towards random access channel self-tuning in LTE. in Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), Spring 2009.

Boussif, M., Rosa, C., Wigard, J. and Mullner, R. (2010) Load adaptive power control in LTE Uplink. Proc of IEEE European Wireless Conference, pp. 288–293.

Dottling, M. and Viering, I. (2009) Challenges in mobile network operation: Towards self-optimizing networks. In Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Taipei, Taiwan, April.

EARTH INFSO-ICT-247733 (2010) Deliverable D2.3, December 31, 2010. Available from https://bscw.ict-earth.eu/pub/bscw.cgi/d31515/EARTH_WP2_D2.3.pdf, [accessed 15 March 2011].

ETSI TS 102 706 (2007) *A WRI/WBCSD GHG Protocol Initiative Calculation Tool*, www.ghgprotocol.org [accessed 15 March 2011].

Holma, H. and Toskala, A. (eds) (2011) *LTE for UMTS: Evolution to LTE-Advanced*, John Wiley & Sons, Ltd., Chichester.

Islam, M.N.ul, Abou-Jaoude, R., Hartmann, C. and Mitschele-Thiel, A., (2010) Self-optimisation of Antenna Tilt and Pilot Power for dedicated channels, Modeling and Optimisation in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks (WiOpt). Proceedings of the 8th International Symposium, June.

Jørgensen, N.T.K., Laselva, D. and Wigard, J. (2011) On the potentials of traffic steering techniques between HSDPA and LTE. In proc. of VTC Spring 2011, Budapest.

Laiho, J., Wacker, A. and Novasad, T. (2006) *Radio Network Planning and Optimisation for UMTS*, 2nd edn, John Wiley & Sons, Inc., New York.

Langley, P. and Iba, W. (1993) Average-case analysis of a nearest neighbor algorithm. In Proceedings of the 13th IJCAI, pp. 889–894.

Lee, W.C.Y. (1998) *Mobile Communications Engineering*, McGraw-Hill, New York.

Mogensen, P., Wei Na, Kovacs, I.Z., Frederiksen, F., Pokhariyal, A., Pedersen, K.I., Kolding, T., Hugl, K., Kuusela, M. (2007) LTE Capacity compared to the Shannon Bound. In Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), Dublin, May.

Nihtilä, T., Turkka, J. and Viering, I.(May 2011) Performance of LTE self-optimizing networks uplink load balancing. Accepted to IEEE Vehicular Technology Conference Spring 2011, Budapest.

Schwartz, M. (1988) *Telecommunication Networks: Protocols, Modeling and Analysis*, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts.

Siomina, I., Värbrand, P. and Yuan, D. (2006) *Automated Optimisation of Service Coverage and Base Station Antenna Configuration in UMTS Networks*, Linköping University, Linköping.

Turkka, J. and Lobinger, A., (2010) Non-regular layout for cellular network system simulations. In Proceedings of the International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC '10, September), Istanbul.

Uehara, K. (1998) Random case analysis of inductive learning algorithms. In Proceedings of the First International Conference on Discovery Science.

Wang, Y., Yang, X., Ma, A. and Cuthbert, L. (2009) Intelligent resource optimisation using semi-smart antennas in LTE OFDMA systems. in Proceedings of IEEE International Conference on Communications Technology and Applications (ICCTA, October).

Yilmaz, O.N.C., Hämäläinen, S. and Hämäläinen, J. (2009a) Analysis of antenna parameter optimisation space for 3GPP LTE. In Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), Anchorage, Alaska, September.

Yilmaz, O.N.C., Hämäläinen, S. and Hämäläinen, J. (2009b) Comparison of remote electrical and mechanical antenna downtilt performance for 3GPP LTE. in Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC), Anchorage, Alaska, September.

Yilmaz, O.N.C., Hämäläinen, S. and Hämäläinen, J. (2010) Self-optimisation of Remote Electrical Tilt. In Proceedings of IEEE Personal, Indoor and Mobile Radio Conference (PIMRC), Istanbul, September.

Yilmaz, O.N.C., Hämäläinen, J. and Hämäläinen, S. (2011a) Self-optimisation of Random Access Channel in 3GPP LTE. International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), Istanbul.

Yilmaz, O.N.C., Hämäläinen, S. and Hämäläinen, J. (2011b) *Optimization of Adaptive Antenna System Parameters in Self-organizing LTE Networks*, to be submitted to *Wireless Networks*, Springer, Heidelberg.

Zheng, Y.R. and Xiao, C. (2002) Improved models for the generation of multiple uncorrelated Rayleigh fading waveforms. *IEEE Communications Letters*, 6(6), 256–258.

第6章 自　　愈

Szabolcs Nováczki、Volker Wille、Osman Yilmaz、Seppo Hämäläinen 和 Henning Sanneck

蜂窝网络是一个极其庞大、复杂的系统，因此经常会发生一些故障。对于如此复杂的蜂窝网络，许多功能都会出现故障，但从故障管理的角度来说，无线接入网无疑是其最关键的部分。网络中每个基站负责覆盖其特定的区域，一般都没有冗余覆盖。如果网络中的一个网元由于故障不能完成其相应的功能，而网络中又没有其他实体可以代替该网元去提供相应服务，就只能在该网元的故障消除后才可以恢复服务。在网络性能恶化期间，用户将不能享受到有效、可靠或具有 QoS 保障的服务，这样可能会严重影响运营商的收益。

网络操作者面临的首要问题是，网络中存在成千上万个网元（比如基站），而其中每个网元都有可能发生性能恶化。这些性能恶化主要体现在那些不容易辨别出是什么原因造成的 KPI 值变化及告警信息。因此，需要工程师一直分析性能数据来排除障碍，这会耗费相当多的人力资源。当然，手动工作也意味着上面所提到的性能恶化持续时间可能很长。

在 6.1 节，主要介绍 3GPP 框架下自愈的应用场景及处理流程；6.2 节、6.3 节将分别介绍性能恶化的检测和诊断，包括对故障预测方面的简单介绍；6.4 节将说明小区失效如何补偿。

6.1 背景简介

在通信产业中，网络运营（尤其是排错工作）是主要的消耗成本因素。因此，需要尝试引入一些网络功能来减少排错成本。在写作本书时，3GPP 的技术规范（TS32.541，2010）已经对自愈的概念和需求进行了定义。此外，还有 4 个文档描述了自组织网络策略的网络资源模型的集中参考点的信息服务（3GPP TS32.522，2011；3GPP TS32.762，2010）和解决方案（3GPP TS32.526，2011；3GPP TS32.766，2010）。这些技术规范不仅定义了 3GPP 网络自愈功能的应用场景，也定义了高层的概念、需求、相关的逻辑架构和参考模型。

6.1.1 3GPP 应用场景

6.1.1.1 网元软件的自恢复

多数情形下，网元故障可以通过将早期版本的软件或配置信息重新载入来排除，因此需要将网元软件恢复到初始或早期状态来保证网元的正常运行。如果网元软件需要启动自恢复功能来修复故障，那么此时会验证相关软件版本。发生故障的软件将会

被移除同时启用备用软件，同时校对配置参数。如果发现配置参数有误，配置参数将会重新恢复或重新配置，如果没有修复成功，这个过程将会重新启动。最后，故障修复的结果经核对会通知网络管理者（IPRManager）。

6.1.1.2　硬件错误自愈

硬件故障是网元中另一个经常出现的错误类型，本应用场景就是想通过自动转移或解决这些故障来避免影响用户，如当主板卡出现故障时，系统将会自动切换到备板上。在此过程中，首先需要采集故障板卡的冗余信息。如果有备板可以接替故障板卡的工作，则切换到备板工作，否则网络管理者（IPRManager）将会收到告警信息。

在本书写作期间，3GPP TS32.541（2010）只考虑了一个小区失效的场景：在本场景中，失效小区不能提供任何无线服务，用户不能在该小区建立或保持任何无线承载。本书中，与小区失效管理相关的应用场景如下：

6.1.1.3　小区失效检测

系统会自动检测失效小区，比如睡眠小区（在用户请求业务时不提供任何业务也不会产生告警）、无服务小区等。一些系统变量、性能指示、告警会被持续检测并同阈值、配置文件相比较，如果出现告警或某个观察变量超过了阈值，就会触发一些相应的纠正操作，并将相应报告发送给网络操作者。

6.1.1.4　小区失效恢复

系统可以将失效小区自动恢复，其简单原理是：基于检测和诊断结果，系统会激活一个最有效的恢复操作，如网元重置，并将结果上报给运维人员。

6.1.1.5　小区失效补偿

本应用场景旨在说明系统有能力自动补偿一个失效小区，尽可能满足更多用户的基本服务需求。首先，系统会采集有效的配置信息来研究这种情况，然后通过重新配置相应小区来提高失效小区覆盖范围内的服务质量（具体见6.4节）。

6.1.1.6　从小区失效补偿中恢复

系统补偿完失效小区后将恢复到正常操作状态。如果引起小区失效并触发失效补偿的故障已经解除，那么这些接受失效补偿的小区将会被自动重新配置。

6.1.2　3GPP 自愈流程及其管理

自愈功能主要由图6.1左侧所示的一些逻辑功能模块组成，这些功能模块主要提供功能检测或自愈流程。它们可以存在于区域网管（DM，参见2.1.9节）或网元中，或同时存在于两者之中。

一般的自愈流程主要包括以下步骤，但需注意的是，在自愈流程中，具体步骤的顺序和内容在不同的自愈应用场景中会有所变化。

首先，“输入检测”功能会一直检测网络中的预设条件是否能够触发愈合流程。在触发条件满足的情况下，将会触发相应的自愈流程。

其次，在“自愈流程”激活后，它会首先收集与故障相关的必要信息，如性能指示、无线测量、系统变量和测试结果等。这些功能模块包含了6.2节提及的检测功能。

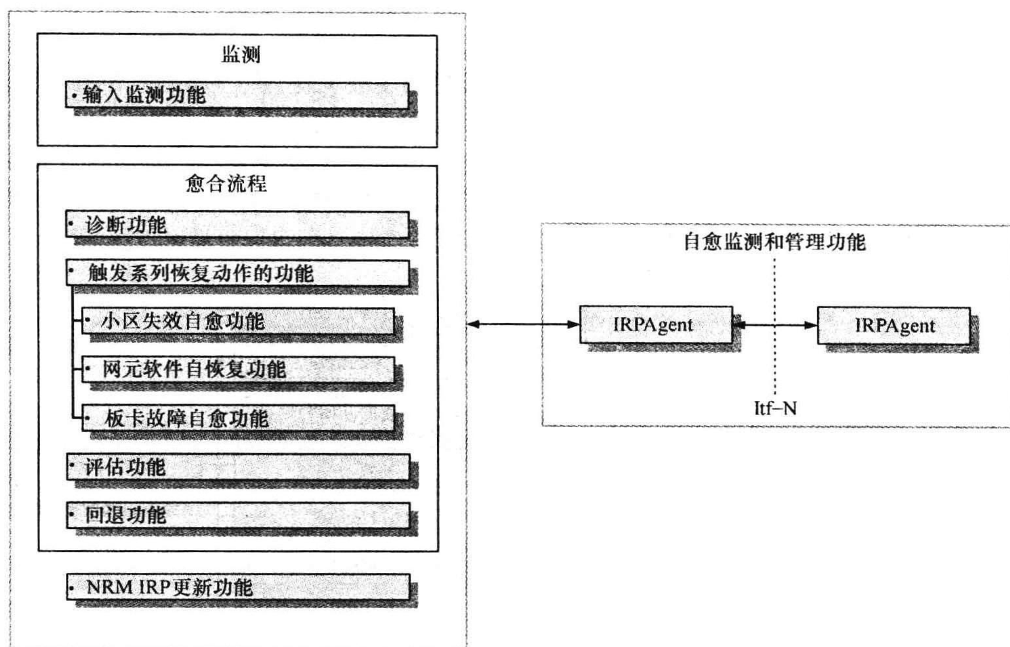


图6.1　自愈流程

基于触发条件和其他信息，通过分析和诊断故障，从而发现所检测到的故障根源（具体见6.3节的诊断功能）。

诊断出的故障根源可以采取自动或手动的方式解决。若存在自动恢复操作，那么它将首先被执行。在执行恢复操作前，也许需要备份相关的配置参数，以便回退到该配置。

完成这些纠正措施后，需要对结果进行评估（“评估功能”），即去评估故障是否已经解决，以及有无其他问题出现。若故障未解决，结束条件没有满足，自愈流程就需要重新执行一个愈合过程。若故障已经解决或一些结束条件阻止新的愈合过程，则将自愈的结果上报。在一些情况下，还需要回退到之前备用配置上（“回退功能”）。

在整个过程中，会产生一些日志，主要包括记录恢复动作和自愈过程中产生的一些重要事件。

这种自愈中的监视和管理功能（见图6.1中的右侧）监督着整个自愈过程，并向运维人员提供与自愈过程相关的信息。该功能能够获得所有其他功能模块的信息，此外它还允许运维人员控制自愈过程的执行。该功能包含两个逻辑实体：IRPManager（参见2.1.9节）是该功能的管理实体；IRPAgent是该功能在北向接口（Itf－N）下的操作实体。

一般，IRPAgent可利用IRPManager获得自愈功能的各种信息并控制它们，如图6.2所示。

6.1.3 小区恶化管理

小区恶化管理应用场景是自愈研究和标准化的主要关注点（Van den Berg 等人，2008，3GPP TS32.541，2010）。虽然3GPP应用场景重点关注“小区失效”问题（见6.1.1节），不过接下来我们采取更笼统的概念——小区恶化（Cell Degradation，包括了失效这种情况，具体定义见下面）。请注意，对于“恶化”应用场景，同只考虑失效相比“诊断”功能（在3GPP TS32.541，2010，没有定义）可以更易发现详细缘由。

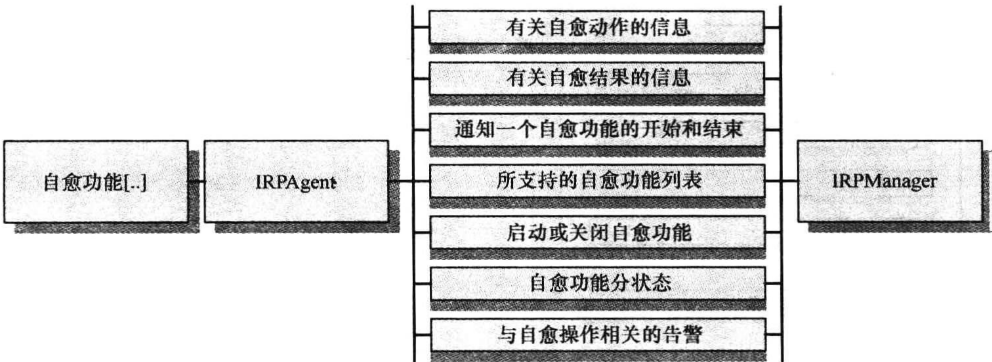


图6.2 监测和管理功能的主要需求

传统的小区恶化管理过程包含4个任务（见图6.3）。首先，在分析告警列表的

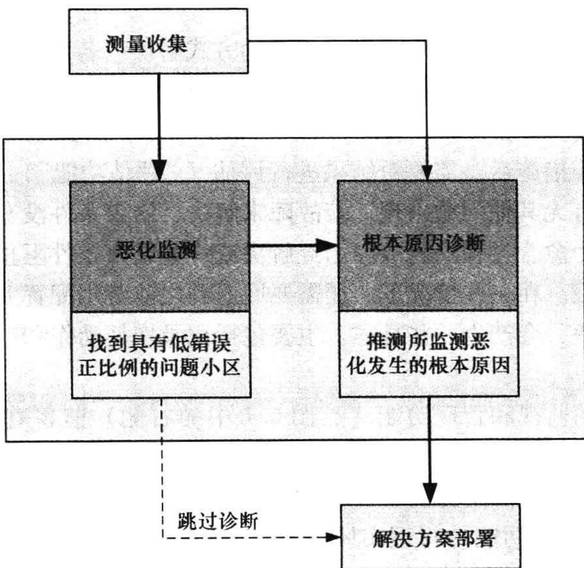


图6.3 小区恶化管理流程示意图

基础上还必须测量性能数据。这些数据一般都采集并存储到性能数据库中。LTE 扁平化架构使这种数据采集难度比较高，同时也不利于将小区恶化管理功能转移到网元上。工程师通过分析性能信息来辨别小区，以发现恶化的根本原因。检测到一个故障却根本没有诊断它，这是时常发生的情况。在这种情况下，通过采用小区重置来解决大部分与软件相关的简单问题。最后，就会展开纠错操作用以修复或补偿故障。就像前面提到的（见 2.2 节），在传统的宏小区中，没有网络冗余来解决小区退化，但是这种情况在异构网络场景（见第 10 章）中就不一样了，在相同的覆盖区域中会有多种资源层。

若没有自组织网络，蜂窝网络中的性能恶化一半都是半自动检测的，同时还需要多个部门的人员一起工作。相应的运维部门需要在一周全天候的监视网络，主要检查与设备相关的硬件或软件告警信息。一旦这种告警出现，必须采取相应的纠错操作。对于网络中心出现的新告警，一般是将小区重启。如果这样能将故障解除，那么就不需要考虑进一步的操作，也不需要去分析故障产生的原因。通常重启后系统会追踪记录小区的重启次数。若在一定时间内的重启次数达到了一定值并且故障还没有排除，小区将不会再重启。在这种情况下，故障就会移交给相应的工程师去具体分析，首先会通过远程进行分析，因为在现场操作开销较大，若还是无法解决问题，工程师才会到现场去解决问题。而多次实地考察去解决一个复杂的问题是很常见的事情，在这种情况下，往往需要更换一些硬件设备才可以解决故障问题。

在网络优化部门，不是等到出现故障才去检测性能是否恶化，而是在关键性能指标（KPI）出现恶化时就需要进行检测。工程师会集中关注给定时间内性能表现最差的小区（比如在一周内掉话次数最多的 10 个小区），或不同时间段性能表现发生巨大转变的小区（比如每天的掉话次数急剧变化的 10 个小区）。

一旦开始对特定小区进行分析，就需要同时考虑告警信息和 KPI，因为任何单独的指标都不能提供足够的信息来解释由于多种原因造成的性能恶化表现。通常，告警对于指示与硬件相关的问题比较有用，而没有告警的 KPI 指标恶化则表明有其他因素的影响，比如干扰。这些影响通常与硬件不相关，但与不恰当的规划或配置以及软件故障有关。一般认为硬件错误不会直接导致节点内部错误操作引起的严重性能恶化，同样不是所有的较差性能都是由硬件错误导致。所以，以上两方面为确定网络性能差的原因提供了互补的信息。

纠错的方法改进地比较缓慢，从早期的 GSM 到 3G 以及 LTE 都只是做了一些移植，并没有根本的改变。需要强调的是，每个运营商都有自己的方法去判别性能恶化。前面提到的通用做法一般都会用到（最差性能与/或最大步进改变），不同之处主要在于所选的时间周期和将过去排名并入到最近排名的比重，如可以将过去两周的数据合在一起进行排名，或每周各排一次名，然后再合并。每种方式得出的结论会略有不同，那么以不同的方式使用同一种方法产生了不同的排名结果。注意，只有在有限时间内造成性能恶化的“特殊事件”发生时，才会采用这些半自动的方法。如果采用自动方法，在自愈过程中也需要了解这些特殊事件的相关信息。

通常已经部署的方法需要在检测速度和检测精度之间进行权衡。一个 KPI 的恶化

时间越长，恶化由故障引起的可能性就越大，从而可以排除一些因临时突发事件引起的恶化，比如交通事故或道路关闭。因此，在采取任何纠正动作前包括人为纠错，最好进行一个较长时间的检测，这样就可以过滤出那些因临时事件引起的短期故障，从而提高检测精度。然而检测的时间越长，用户必须使用不良服务的时间也就越长，这将不可避免地导致用户投诉增加。所以在遇到这种情况时，需要尽快做出决定，运维人员应根据他们对“速度和精度”的要求来决定故障检测方式。

基于检测到的告警信息和/或 KPI 值的恶化，有效的解决方法是在故障检测后直接对硬件自动重启。这种方法适合于引起告警的设备问题，重启网元在大多数情况下都能够解决问题。但是重启并不能解决一些由外部原因引起的性能恶化，比如不适当的规划或配置，因为重启并未触及引起问题的原因。尽管重启包含一系列的动作，并且成功的概率不高，然而重启可以安排在夜间自动执行，并且重启的代价比较低（不可忽略的是也可能重启后的网络性能比之前更差了）。这就可以向故障检测工程师证明，恶化不太可能是因为突发的设备问题造成的，不是简单的重启设备就可以解决的。因此没有必要在检测到故障后就直接触发小区重启。在大多数情况下，小区重置必须认真规划，尽量安排在没有流量或低流量的时间期间。

在故障检测中虽然有部分任务已经可以自动实现了，但是还是需要人工对引起故障的基本原因进行诊断。能否快速确定问题原因与工程师的经验和已部署方法提供的信息质量紧密相关。工程师解决这些问题的技能都是通过大量实践获得的，不可能通过其他理论学习获得。需要注意的是，同一故障在不同的设备商之间表现不一样，有时在同一个厂商的不同软件版本之间表现也不同。

需要注意的是，尽管上面提到的步骤描绘出了排错工作的特点，但各个运营商在具体的实现流程上差别还是非常大的。

在详细探讨恶化检测和诊断之前，将后面会用到一些重要词语总结如下：

1）症状：指性能指标和告警所表现的异常现象，通常是由故障引起的，有时也会因网络/用户的不规范行为（但不是故障）造成。但正常的操作中也会在性能数据上出现一些异常现象，这样就会很容易与那些由故障造成的异常现象相混淆。

2）恶化：是指一个小区的实际性能表现与期望之间有比较大的差距，即一个小区不在健康状态，虽通过自优化可以提高性能，但是它显然是低于预期的最低性能（如用户在一个小区经历由于错误配置造成的掉话，比经历高负载小区 QoS 恶化还要糟糕）。恶化不能直接被测量出来，但可以根据发生的故障，通过一个或多个症状表现。恶化根据严重程度可以进一步分类：范围可以从性能问题严重到不能传递任何流量的失效场景。很明显，一个完全失效小区比一个睡眠小区容易检测，依此顺序，一个部分性能恶化的小区会更容易检测。从另一方面来说，失效需要上站修补或需要更多资源的复杂补偿（见 6.2 节），而一些不太严重的恶化则可以通过重新配置或重启小区来实现。

3）故障：主要指会引起恶化的硬件、软件、配置和规划问题。一个故障的严重程度主要由故障起因的严重程度来决定。一些故障起因只会引起性能下降，而一些故障起因则会造成网元的完全失效。更有甚者，故障会随着时间推移而演进，刚开始只

是造成比较小的问题，逐渐就会造成严重的失效。

蜂窝网络中出现的问题是各种各样的。下面对这些故障种类进行分类：

1）硬件故障：主要出现在网络实体中的物理部件上，会通过明确的告警信息（尽管比较低层次）来现实。问题不仅与天线及其与基站的连接有关，也与基站中的组成元素或传输线缆有关。

2）软件故障：出现在网元中的程序执行中，也会影响业务性能表现。

3）规划和配置故障：主要是因为网络规划和配置是人工完成的，这会造成很多问题。

4）环境改变：环境改变会极大地影响无线环境。建筑物的建设和推倒将会造成小区的覆盖和容量发生不可预测的变化，从而导致性能下降。

6.2 小区恶化检测

小区恶化管理的流程中第一个步骤是检测有恶化表现的小区，即故障检测，一些用来检测并区分不同故障类型的算法。但这并不是这些算法的目标，这些算法主要是检测这里是否产生恶化，具体到是什么原因造成性能恶化就是诊断流程所需要解决的问题。总之，检测算法主要是识别症状并将它们之间关联起来以确认一个恶化的发生。诊断结合检测结果去分析所检测的症状是由什么原因造成的。

正如前面提到的，不管是自动还是手动，检测流程主要基于性能指标进行操作。下面对故障管理过程中经常使用的性能指示进行分类：

1）计数器：一个计数器记录一个单个值，主要是由网元（如一个 eNB）的固件或软件维持的。如一个事件计数器（故障计数器）就会针对相应的特定事件发生次数逐次进行记录。

2）关键性能指标（KPI）和关键质量指标（KQI）：一个 KPI 根据一个或多个计数器或测量值，按照预先定义的公式（经常是标准化的，3GPP TS32.410，2011），计算出一个值。多个 KPI 汇聚在一起用来表征一个更广泛的网络性能表现，即 KQI，但是很少使用 KQI 来评测小区级的性能。

3）告警：告警是预先定义的事件发生后，由网元发送给网管。故障一般会由硬件或软件触发，但一些性能指示相关的事件（KPI 引起某个门限值抖动）也会触发告警。

小区性能表现的指标可以从不同的源获得：

1）控制小区的基站；

2）小区或相邻小区服务的用户设备（UE，3GPP TR36.805，2010）；

3）位于相同或不同基站下的邻居小区或其他小区；

4）核心网元、网关等。

异常检测的主要目标是确定指标的实际值是否符合期望值。是要发现性能指标离开正常值，但依然在健康的操作域中，而不是发现性能指标进入一种错误状态。首先，在如何发现问题上好像没有太多的区别，但是当引入自动化后就变成一个关键的决策。在第一个应用场景中正常操作域是必须定义的，而在第二个应用场景中性能指

示的值，尤其是在特定的故障情况下的值，必须写出来。蜂窝网络是一个高度复杂的系统，它所表现的性能指标都是随机的（见下面的解释），在大多数情况下需要采用统计手段来描述正常或故障操作。第二种应用场景存在疑问，因为故障是发散的，在蜂窝网络活动期间，相应的事件出现的机会比较少，这样就会造成比较少的样本而无法进行统计计算。而正常操作可以采用统计方法，这是因为有大量的可获得的性能数据。

一般来说，术语“profile”主要是指可以反映一定时间内（如以一天内每小时为粒度）的一个性能指标的时间变化的数据结构。在本书中，profile 范围扩大到可以支持任何方法，以支持这些方法定义的一个性能指标中的正常操作域。profile 在自动异常检测中非常重要。

在安全操作期间，每个特定的性能指标的时间结构不同，那么所使用 profile 的类型也不同（见图 6.4）：

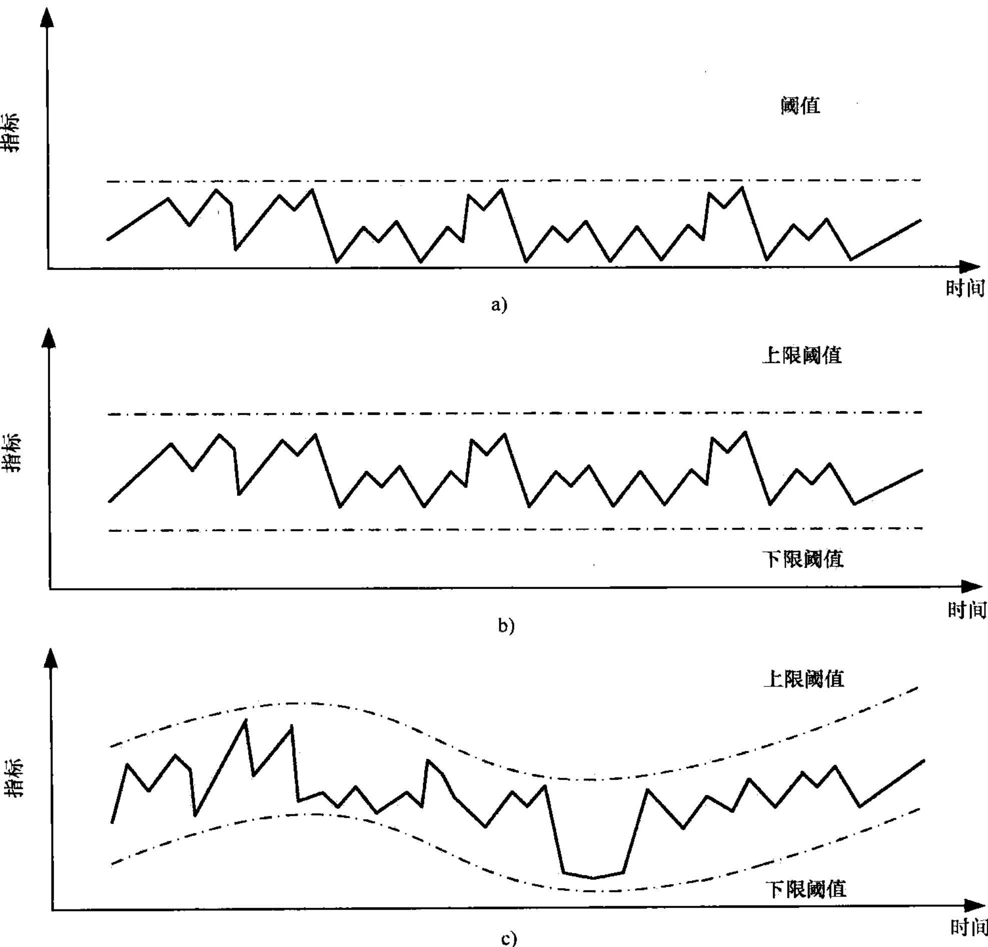


图 6.4　性能指标和相应 profile 文件的时间结构

1）绝对门限 profile：比较广泛的一类指标，性能信息不能高于或低于某个门限（见图6.4a）。典型的例子就是故障频率（故障次数/所有次数）和故障次数（一定时间内故障发生的次数）。这些指标的 profile 是一些简单的绝对门限（如掉话数目不能超过所有通话的1%）。

2）统计 profile：另一类指标就是会在一个期望值（均方值或平均值）附近变化（见图6.4b）。这里的 profile 就是一对门限值，用来定义可以偏离均值的最大范围。上限和下限可以是对称或非对称的，甚至只需要有一个就可以。有许多方法来定义最大偏离，比如可以将门限设为标准偏离的一些比较小的倍数（如1、2或3）。

3）基于时间的 profile：这些指标主要用来显示时间的周期性规律，一般是由用户行为驱动的。这一类采用了 profile 的本来意思。这些 profile 主要是一些数据结构，主要用来代表一定时间粒度上相应的指标的期望值（如一个小区的负载在一天中每隔15min 期望是如何变化的）。这些指标可以与多个 profile 关联（如一个是工作日的，另一个是周末的）。

需要注意的是并不是所有的指标都可以用上面提到的 profile 来表征。这类指标，尤其是小区级，有一些是由用户需求驱动的，而有一些则不能表现出周期性，结果这些指标的正常操作域不能显示真正的时间结构。如在基站（如3G 网络中的 RNC）上面的吞吐量就有很强的时间周期性，而在单个小区级（虽然晚上和白天的不同是有目共睹的）时这种周期性比较弱。因此，排错专家就无法单独评价这些指标，还需要更多的小区的整体信息。

总之，异常检测主要由下面3个步骤组成：

1）定义感兴趣的性能指标。

2）为每个指标定义一个正常的、期望的操作域。

3）在操作期间，每个指标的实际值必须对相应的 profile 进行估计。

在当前排错任务中，绝大多数都可以实现一定的自动化：性能指标收集、profile 构造、实际性能指标与 profile 之间的对比等都可以自动完成。由于这些检测流程仍会产生一些正面性的故障告警信息，因此仍需要提高当前这种情况。问题是尽管没有故障，性能指标还是经常会显示一些异常行为，导致检测算法无法区别真正的故障和异常网络行为。恶化检测研究的主要目标就是提高这种分辨能力。

改善的自动检测方法，基本是结合对于性能指标更深层次的统计，通过应用更加详细的统计模型去定义指标的操作域来区分故障情况和异常情况。

自动异常检测方法可以分为两大类，学术界针对每一种都提出了多种方法（Chandola 等人，2009）。

单变量技术主要是考虑一个特定的指示来决定它是否与期望表现的一致。这些算法通过分析相应指示的历史表现来建立一个代表正常操作域的统计模型（如在简单例子中只有均值和标准偏移）。这些方法的共性是它们都不能区分真正故障和异常小区行为所引起的异常现象。检测精度更多的是依赖于统计模型（如 profile）而不是实际的检测判决，这也就是说最有挑战的是构建一个好的 profile。一旦这个 profile 在实际中应用起来，只需要将实际的性能与 profile 比较，这就相对简单了。

比较有名的单变量技术如下：

Barreto 等人在2004 年提出了一个竞争神经元算法，其主要是在3G 蜂窝网络中进行故障检测和诊断。

Cheung 等人于 2005 年提出一个算法——操作故障检测（Operational Fault Detection，OFD）算法。OFD 算法不需要运维人员手动设置门限就可以分析性能指示、检测故障信号。取而代之的是广泛应用的可能性测试方法，自适应确定一些门限。通过它早期的行为或比较类似的系统来进行分析，就可以建立系统的 profile。这里有一个假设，即在正常条件下，系统行为跟以前是一样的，并且与其他一些系统类似。

Rao 在 2006 年也对 OFD 算法进行了研究，定义了一个统计假设测试框架来决定故障。在训练期间可以通过学习期望的偏离来决定门限。故障门限适用于空间和时间维度上的移动流量模型。

Zanier 等人在 2006 年提出了一个用来检测 WCDMA 网络的覆盖和主导问题及鉴别干扰的方法。所提及的方法中不采用车载测试和仿真数据，每个小区可以定义一些度量值，在正常网络操作下通过无线接口来交互小区间的信令消息，以反映真实的流量分布和用户地理位置。

基于移动终端上报的邻区列表，Mueller 等人在 2008 年提出并验证了一个小区失效检测算法。失效小区无法提供任何业务并且不可操作。该算法的思想是利用 NCL 报告建立可视的关系图，图中的顶点代表小区或扇区。根据 NCL 报告可以生成图的边缘，其中边缘的权重决定移动终端的数量，这些移动终端已经报告了一定的邻区关系，这样失效检测的问题就变成了对可视图的变换模式类别判断的问题。这种算法虽然具有全面的良好的检测灵敏度，然而对于实际应用来说，这种产生错误告警的趋势太严重了。

多变量异常检测方法可以评估一个小区的整体性能，这里需要采用多个指示并且它们之间是相互印证的。在其他工程问题中多变量异常检测方法应用得比较多，然而近来一些公开发表物上采用相同的方法来解决蜂窝网络问题：

Turkka 等人在 2011 年提出了一个新的概念——差分图，可以通过减少维数来跟踪 3G 中的问题。其目标是从大量的数据中识别异常基站，并找出为什么这个基站与其他基站不一样的原因。

Chernogorov 等人在 2011 年也提到一个同样的方法。该方法检测睡眠小区（睡眠小区看上去没有问题但是不提供任何服务）的存在，并定位小区。

自组织图（Self - Organising Maps，SOM）是一种基于网络的神经算法，它可以将多变量数据视图化。在 Laiho 等人（2005）和 Wietgrefe 等人（1997）的研究中，作者将 SOM 方法与传统的聚类方法相结合，可以有效地用于简化和聚焦网络分析。这些方法可以将一些行为类似的小区可视化并组成组，易于专家辨别不同的网络状况，能够更快速有效地检测出错误并优化小区参数。这种算法适用于不同的无线接入网络。

除了检测方法，有必要对实际检测的性能度量参数进行定义。这些度量参数用来验证和比较不同的技术。最重要的两个度量参数是检测精度和检测时延（见图6.5）：

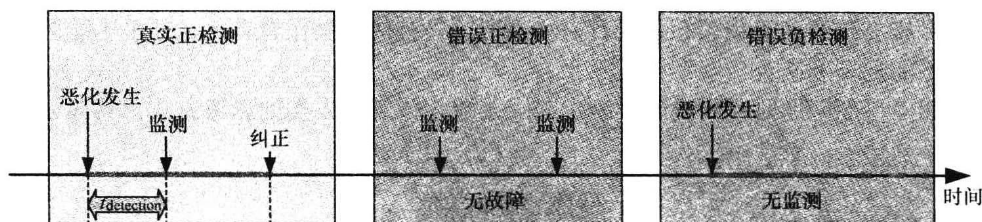


图6.5 恶化监测精度和延迟

1）检测精度。主要包括两方面：一方面主要指检测方法的可靠性，当网络中出现一个异常时，它可以显示出来（如真实性）。错误正检测就是当网络中没有发生异常（如一些正常但不经常出现的行为），却通知了运行维护人员存在恶化。另一方面，需要一些可以有效检测异常，而且不会放过任何异常的方法。当网络中一个异常发生时而检测方法没有检测到，这种情况就是错误负检测的例子。检测系统的主要挑战之一就是在检测精度这两个方面选择一个很好的折中（如折中灵敏度）。

2）检测延迟。主要指从实际异常发生到被检测这段时间的间隔。只有故障正检测（在异常发生期间检测到该异常）才计算检测延迟。有时会出现在异常消失后才检测到异常的情况，这主要是因为检测器中的延迟（检测器输出结果需要一定的时间）或错误正检测情况造成。由于无法直接区分这两种情形，假设在异常发生期间外检测到的为错误检测，那么只有在异常发生期间检测到的，即真实检测才考虑检测延迟。

除了检测方法的主要特点外，还需要考虑在实际部署时，存在一些恶化检测方法需要考虑的因素：

1）严重性指示精度：一个检测器输出的指示恶化严重度的指标。当可信的严重度指标显示必须采取纠正措施时，这个信息是关键输入之一。

2）信令开销：故障管理功能引入的信令开销可以分为两类，其中一类是与传输网络有关，另一类是信令通过空中接口时所产生的处理开销。传输网络的开销包括所有在传输网络上传输的数据，如eNB之间的X2，基站和MME之间的S1，eNB和OSS之间Itf-S接口。测量取决于网络架构，也就是说解决方案可以是集中式、分布式或是混合式（见3.4节）。不管怎样，有种方法可以测量所有接口的估计开销。信令开销也包括一些用户和基站之间方便恶化检测的信令，如包括用户测量的建立和传输。

3）处理开销：为检测恶化而需要的处理所花费的开销。一个算法的执行时间与处理的输入数据（如测量数目）大小有关，有可能是渐进对数的、多项的甚至是指数的关系。通过分析渐进的执行时间可以明确一个算法的处理需求，进一步进行理论分析。

6.3 小区恶化诊断和预测

从前面的描述可知，在商用蜂窝网络管理中恶化检测已经实现了部分自动化功

能。然而原因诊断仍是一项手工劳动，需要相应排错专家的知识来支持。这些知识都是排错专家多年的经验积累，一般具有主观性，与具体的操作者有关，几乎不能公式化，也不能记录下来。

当面对诊断问题时，传统的故障诊断人工流程体现了人类的思考方式，具体如图 6.6 所示。

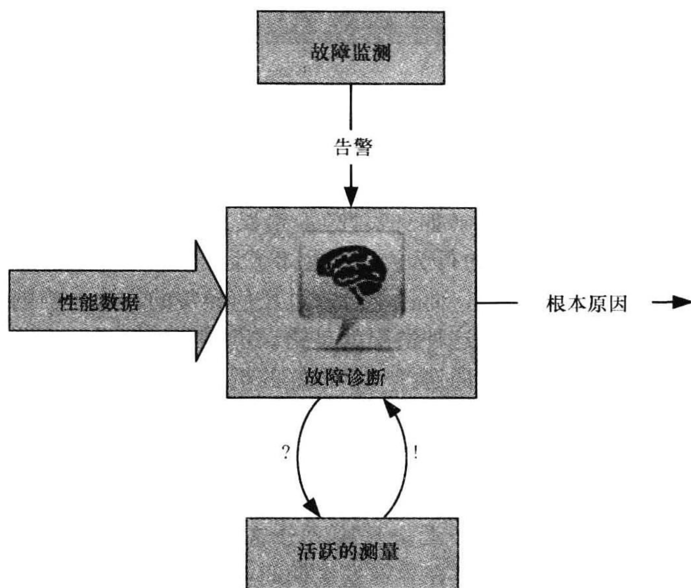


图 6.6　小区恶化诊断流程示意图

恶化检测处理的输出通知网络故障管理系统网络中可能出现的问题，并触发诊断过程。触发可能是一个软件或硬件报警或违反阈值的 KPI。故障诊断专家对可用的性能数据进行分析，寻找一定故障的症状特点。基于观察到的症状种类，从而反映最有可能的根原因。一般，触发诊断过程的数据量和类型辨识的根原因没有足够的可信度。专家利用现有的信息来缩小可能出现的故障范围，但还需通过动态测量得到更多的相关信息，以找出确切根源。此外，在一些情况下，当无法远程获得额外的性能信息时，需要安排路测来获得所需的信息。

故障检测员的专业知识水平，以及可供分析的信息（即 RNC 性能信息汇总，对于发现一个特定小区经历恶化并不总是有用的）粒度影响实际诊断的时间和质量。最终用于可视化相关信息的工具是另一个基本方面。这是一个极具挑战性的任务，需要充分理解系统本身、潜在故障以及性能指标分析工具。这种专业知识是一个重要的资质，只能在多年的故障检测工作中获得。

蜂窝网络的规模和复杂性不断增加，这需要在 SON 框架内实现高效的自动化故障诊断工具和方法。自动化程度较高的故障检测能够减少找到问题故障所需的时间。自动化的直接成果是提高网络性能，减少恶化的时间。自动化的另一个影响是，由于

能够做相关工作的劳动力资源较少，所以它降低了相应的成本。故障检测人员只需较低的入门级技能就可以，专家知识存储在自动化系统中，可以帮助经验少的工程师找到故障根源。然而面对很难诊断及需要深刻了解的复杂情况，可能仍需高度熟练的故障诊断专家进行分析。

当然，完整的自动化诊断过程是这个长期进化过程的未来目标。第一步是学习/定制阶段，即把专家知识融合到系统里。在学习阶段，系统是不能够协助故障检测过程的。当系统已经获得了足够的知识基础，它可以进行到第二阶段，即协助阶段。在协助阶段，专家系统能够给排错工程师提供有关最可能的故障的建议，但最终决定仍然在工程师的手中，工程师将结果反馈给专家系统。这种反馈可以用来进一步精炼和微调存储的知识。最终，当系统的知识储备和决策能力逐渐增强，它就取代人力自动触发纠错操作。人们未来的希望是，操作者只需监督自动诊断系统，通过定义高层次的策略指导自动化的故障检测过程，而留下的细节工作则交由专家诊断系统完成(参见11.3.3节)。

从自动化视角来看，在这个过程中最关键的一步是现象与根本原因之间的关联，常被称为专家知识。已经表明，在诊断过程中工程师收集所有可用的观测数据，并根据其故障检测的经验，将它们映射到最有可能的根源。这是一个非常直观的过程，这些专业知识都是在多年故障检测中获得的。因此，绝大多数自动化方法都侧重于将专家知识收集和集成为一个框架，从而能够执行同样的推理过程，这基本上是一种机器学习问题。另一个重要的方面是专家系统有能力适应不同的环境（即运维人员、网络、技术)。专家系统必须能够专门学习它所诊断的网络的特殊性。

下面将介绍一些蜂窝网络中自动故障检测的方法。所有这些系统的目标是提取、存储和利用排错专家的数学背景知识。

6.3.1 规则化的系统

第一类系统是基于规则的系统，它主要是存储专家知识，并利用这些知识诊断复杂环境中的故障。这些系统的基础是如果（A）—然后（B)，其中A是观测到的现象，B是根原因或动作。在操作过程中，如果存储的条件得到满足，专家系统可以推断出可能的根本原因或建议检查另一个条件。故障检测的例子可以是：“如果收到一定的硬件报警，则根据告警检测硬件组件”，或“如果有太多的失败切换，则检测是否是根据规划的邻区关系进行切换”。

基于规则的专家系统通常容易建立，因为在大多数情况下，操作人员使用的排错流程与上面提到的规则很类似。这是一个很大的优势，因为这些系统提供了一个与人类的推理相同的逻辑推理方法，容易建立推理模型。

基于规则的系统是模仿人类故障诊断推理过程，已经在小的确定性环境中证明其有效性，但在应用到一些比较复杂的系统（如蜂窝网络）时，会有一些缺陷。一方面需要太多的规则去捕捉每一个可能出现的问题，这使得规则集难以管理并且推理速度缓慢。另一方面，故障诊断专家通常在推理上具有不确定性。他们从观测系统的状态得出的结论也不确定。一些规则，使症状到根原因的映射不是十分确定，这样会影

响专家的推理，例如："如果有硬件报警，那么它很可能有一些破碎的硬件元素"。当然，专家们将首先看硬件故障，但所观测的现象的根本原因有时可能是其他因素。基于规则的系统无法描述这样的不确定性。采用一些方式来扩展基于规则的系统，使其能够表达不确定性（如使用模糊逻辑的不确定性因素），但这个结果会产生更复杂的规则，甚至会得出错误的决定。

EMC 公司于 2009 年提出了一个自动化的根原诊断框架，它建立在基于规则的系统上，并进行了扩展，称为基于推理的码本。该框架利用一个事实，即每一个复杂的系统故障，有其独有的特征。框架存储已知故障的特征，并将实际系统信息（即实际签名）与存储的信息匹配。诊断会寻找最接近的匹配特征，因此它不需要精确匹配。这使得在信息不完全的情形下，工作速度快、有效率。

6.3.2　贝叶斯网络

与基于规则的系统不同，贝叶斯网络（BN）根本上是从古典概率演算而来，因而可以表达不确定性。这个名字来源于基本的概率论贝叶斯定理，它体现了一个随机变量对另一个变量值的条件概率。这可以扩展到多个随机变量之间的条件概率的依赖关系，并可视化为定向的、无环的图形，如图 6.7 所示。

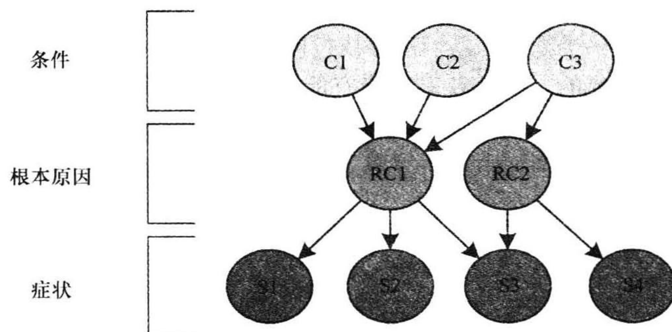


图 6.7　贝叶斯网络的一般架构

贝叶斯网络由多个变量或节点集（其中有不同的离散状态，但也有可能是连续模型[18]）及这些变量之间的有向边集组成。有向边通常反映域内的因果关系，影响强度可以建模为条件概率。应用到故障检测时，这些节点可以代表特定条件、故障（如根原因）以及它们的症状。条件是用来代表环境的全局属性，这就可以更新研究故障和症状之间关联的上下文（如一个小区的运行状态、锁定/解锁）。BN 的网络架构是通过获取专家知识来建立的：定义各项性能指标和感兴趣的根源，通过定义连接和条件概率表捕捉它们之间的关系。举一个例子，一个确定的性能指标恶化（从而导致"症状"），根本的原因可以是一个硬件故障造成的。某些故障的影响强度由相应的各种症状变量的条件分布表项表示。注意，某个问题可能会影响一些症状，而一个症状也可能受几个根原因的影响。条件概率表基于给定的证据（即父节点的证明状态），用于计算实际状态的概率（即依赖节点状态的概率）。

BN网络的核心思想是，推理过程可以是双向的。因此，诊断专家系统可以基于观察到的症状给出可能的根原因。专家们一旦建立了自上而下和注入条件概率知识的BN网络，就可以在操作逻辑上从相反的方向找到根本原因。

此外，BN网络可以随着时间的推移进行配置。观察的情况越多，越有利于提高诊断的准确性。根据条件相关的粗略估计可以启动该系统，之后随着诊断的案例越来越多，系统进一步调整。当然这需要操作者反馈观测到的情况，然而最初的结构和条件概率图是可以自动地从观测样本数据中学习到的（Neapolitan，2004）。

BN网络虽然可以应付不完整和不确定的知识，但却有一个明显的缺陷，即难以建立模型（尽管有可用的学习方法），特别是需要明确多个概率时。因此，创建一个BN网络时，必须在简单性和准确性之间折中考虑。显然，模型需要准确地再现潜在系统里的各种可能条件、故障以及症状，以至于能在每个案例中寻找到正确的问题原因。由于知识获取是一项极具挑战性的任务，而且推理算法越来越复杂，需要相当长的时间和计算资源来完成，这可能会导致相当复杂的模型，因此其目的是定义一个尽可能简单但足够精确的模型。

此外，一个节点是否有多个正在定义和学习条件概率的父节点也成为一个极具挑战性的任务，因为必须为父节点状态的每个可能组合分别定义子节点状态的概率。这是两个方面的问题：一方面，随着父节点状态的数量增加，条件概率表的大小呈指数增长；另一方面，专家们无法确定所需粒度的概率。例如，当发生切换失败时，除了硬件问题外根本原因是干扰问题还是覆盖问题，对于专家来说都很难界定。

为了简化模型的建立，提出了两个普通模型：naïve模型和noisy-or模型。为简单起见，在下面的模型中去掉了代表条件的节点。

naïve模型（见图6.8）是诊断系统中最常用的简化模型的方法。这一范式通过确定一个单一的根源节点所对应的一个可能的根原因，来减少节点的数量。此节点连接到每一个症状节点以代表它们之间的条件依赖关系。请注意RC节点的状态是互斥的，也就是说，在同一时间只可能有一个原因。这降低了该模型的表达能力，因为它不能处理多个并行故障情况。

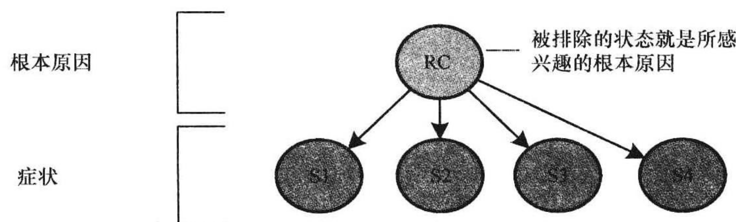


图6.8 naïve贝叶斯模型

noise-or模型（见图6.9）或因果关系独立模型，可以取代naïve模型。它克服了单一故障限制，同时保持了低的模型复杂度。在这个模型范式中，每一个根原因由一个二进制节点代表（即故障存在与否）。如上所述，多个根原因很难提供一种症状的条件概率，因为每种原因的组合都可能会出现。简化noise-or模型的基本假设是，

它抓住了每个原因对特定症状的贡献。因此，noise - or 模型通过直接减少条件概率表的大小来简化模型，而不是减少节点的数量。

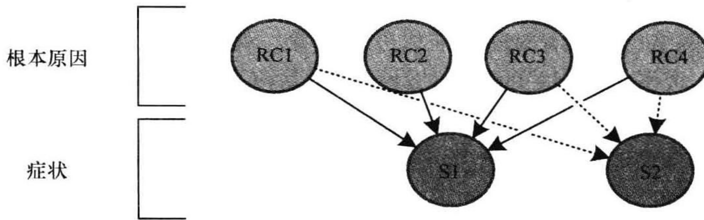


图 6.9 noise - or 模型

一些研究已将 BN 网络引入到蜂窝网络诊断中。

Barco 等人在 2005 年介绍了一个基于贝叶斯分类器的，可以在真实网络中实现自动诊断的简单模型。该模型基于每个病因给定的一系列症状和条件的可能性，专为 GSM/GPRS 网络使用不同类型的原因、症状和条件。

这个方法已经应用到了 UMTS 网络中的诊断系统，见（Khanafer 等人，2008）。

对于离散模型，需要将连续变量离散化才可以加到 BN 模型中去。Khanafer 等人在 2008 年提出应用于贝叶斯模型的确定阈值的两个不同的离散化方法：基于离散化的百分点和最小熵离散化。请注意，使用的方法会影响诊断的准确性和模型的简单性。离散化中好的粒度可以提高精度，但是会引入复杂性（即有更多的状态需要处理，则条件概率表的大小将会增加），因此需要在这些需求之间有一个折中。Barco 等人在 2008 年对连续和离散模型进行了比较，并总结了各自的利弊。

不完善离散化带来的不准确性高度影响 BN 网络诊断的准确性。Barco 等人在 2007 年提出了“平滑贝叶斯网络”（SBN）概念，可以处理模型参数的不准确性。SBN 能够降低诊断准确度的灵敏性。Barco 等人的研究结果表明：SBN 可以成功地处理参数设置不完善，且性能优于传统 BN 网络的结果。

6.3.3 基于用例的推理

BN 网络基础方法的一个明显可用性缺陷是它们对故障场景统计知识的依赖：一个性能指标的条件概率分布应该在每个可能故障场景中定义。正如前面所提到的，在一个小区的存活期内，和正常的操作相比，故障是非常罕见和非常多样化的活动，那么基于故障信息得出的统计模型会非常不稳定，并且对输入变量的轻微变化都非常敏感。而涉及如医疗诊断、打印机故障检测的领域，因为可以从故障记录文本中提取大量相关的统计信息，故所描述的方法是可靠的。由于故障统计信息通常丢失或不足，以致在蜂窝网络中无法建立一个可靠的诊断模型。因此，其他的解决方案基于以下基本思路：使用恶化检测方法来检测性能指标是否表明系统中出现一些异常，并维护一个数据库。该数据库保存了异常模式（即一组表现出异常的指标）与故障情况之间的映射。请注意，这种映射也需要专家的知识，但与 BN 模型对比，并不需要可靠的性能指标统计知识。“基于案例的推理”（CBR）方法是这一类中最突出的例子。

CBR方法与之前所描述的专家系统有着根本不同的形式。CBR系统不依赖于那些需要从领域专家获得的隐性知识。相反，CBR系统存储了以前所观察到的问题情况（故障情况），并建立了一个不断改进的知识库。在解决新的问题时，可以提取出以前类似的案例来解决新的问题（见图6.10）。然后知识库不断随着新问题及其相关的解决方案而更新，类似的新案例在它被解决后也被建立，这样使新的尝试解决方案比之前的要好。从诊断的角度看，这是将与多个根原因相关的症状分类入组。每次出现一个新的故障时，直接与之前已经发现和诊断的案例进行比较。该系统能检索最相似的历史情况和与它相关的诊断结果，因此新故障最有可能的根原因将是与它最相似的早期案例的根原因。然后修改这个解决方案，并观察新方案能否正确处理新的情况。若为正确的解决方案，新的情况会纳入到知识库，否则将手动检测故障，手工过程的结果也会被添加到知识库中。CBR系统具体实现在许多方面可以不同：表示和存储案例的方式不同；与之前最相似案例的相似度定义方法不同。方法的选择在很大程度上取决于问题域的特点，从而高度影响诊断精度（即分类）。尽管CBR系统在其他技术领域已经成功应用（如Montani和Anglano，2006），但直到最近才将其应用到蜂窝系统中进行故障诊断（如Novaczki和Szilagyi，2011）。

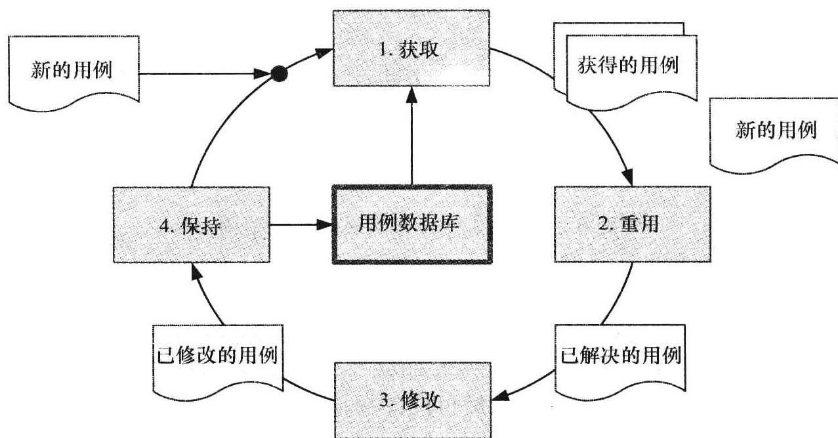


图6.10 基于用例的推理环（Aamodt和Plaza，1994，获得IOS出版社的改编许可）

6.3.4 神经元网络

受到人类大脑中的神经元结构和功能的启发，神经元网络（NN）的数学模型得以建立。NN与BN一样，通常由一组相互连接的节点组成，这些节点也就是人工神经元（见图6.11），是按照层次组织起来的（如输入、输出和隐藏层，比照图6.12）。每一个神经元都与下一层所有的神经元相连接。节点对之间的这种连接是有权重的，权重定义了节点之间的关联程度。输入层的每个节点代表一个输入变量。

在操作过程中，输入变量的实际值被送入这些输入节点进行加权总和计算，通过一个（通常是非线性的）传递函数把结果送到节点的输出模块上。下一层接收输入层的数据的输出，经过层层传播，直到最终的结果显示在输出层。最重要的是，一个

神经网络中连接的权重可以被训练出来。在 NN 中有 3 个主要的学习概念：受监督、不受监督和强化学习。在监督学习的情况下，输入层提供一个输入向量，和输出层的每个节点的预期响应相关联。

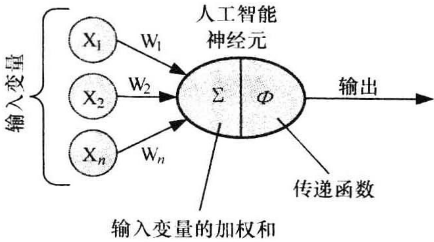


图 6.11　人工神经元网络的一般架构

实际和预期输出之间的差异是用来对权重进行微调的。与前面不同，在无监督学习中无法从外部得知某个输入的正确输出。网络需要通过统计发现输入层中模式集群的重要特征。最后，在强化学习中，通过尝试所有可能的动作从而让系统采取一定行动将可用的功能数目最大化。

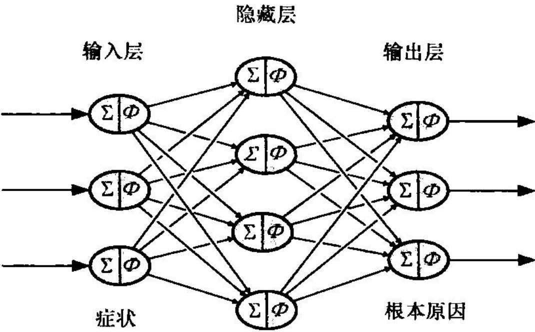


图 6.12　人工神经元网络的一般架构

在故障诊断域的解释是：神经网络的输入变量是系统所观察到的症状，输出变量与根原因相关联，而神经网络中的连接及其权重代表了专业知识。一般来说，诊断神经网络就是一个分类器：不同的输入模式划分到不同的根原因。在操作过程中，一定的输入集群将在网络中传播，并将与最可能的根原因有关的输出节点的输出值设置为最高。

在神经网络竞争学习的基础上，Barreto 等人在 2004 年提出了一种 3G 网络的故障检测诊断系统。竞争学习指学习算法选择一个与当前输入向量权重最接近的节点（即获胜神经元）。Barreto 等人研究和比较了 4 个有竞争力的学习算法。通过代表 CDMA2000 蜂窝系统健康运营的性能数据的训练，构造神经网络模型。向网络提供的训练向量主要包含几个 KPI，如用户数、下行吞吐量等。然后，使用量化误差分布样本构建正常的 profile，主要表现实际状态向量与获胜神经元的权重向量之间的差异。量化误差的分布被称为正常的 profile。profile 相关的置信区间是用来评估实际状态向量的。如果实际向量在置信区间，则认为是健康的；若实际向量超出了置信区间的上限和下限，则认为是故障。用量化误差确定诊断规则，会对找到故障的根原因有所帮助。事实上，本书提出的系统并不指示根原因，而是选择一个或多个可能导致故障的输入状态向量的元素，这会给故障诊断专家提供所观察到故障的可能原因的提示。

Laiho 等人在 2005 年展示了 SOM 通过提高性能状态的可视化来帮助手动故障诊断。从原理上来看，SOM 在聚集和可视化高纬度数据时非常有效。Laiho 等人提出了如何在蜂窝网络中对收集的大量性能信息进行分类和可视化，从而有效地帮助了手动诊断。

Wietgrefe 等人在 1997 年提出了一个神经网络在故障诊断中的应用（告警相关的形式）。

6.3.5　测试

如上述手动诊断过程所述，专家们首先自动接收到一些与网络异常有关的性能指标的通知，进而用这些初始的信息可以大致估计一些可能的根原因（如故障类别）。但通常还会需要更多的信息来挑出实际的故障，此类信息主要通过运行额外的测量和跟踪来收集。在这个迭代的过程中，专家通过收集具体信息来缩小潜在的故障集，这样有助于过滤掉不太可能的故障。通过接收新的信息和额外的测量，专家可以将那些可能性不太高的故障丢弃（通过上面介绍的方法之一），这样将有助于进一步缩小故障集。迭代过程和在每个阶段所采取的测量，可以被视为是一种专家知识，也可以通过自动方法实现。

Varga 和 Moldovan（2007）定义了以太网的故障诊断框架，主要使用重复迭代诊断过程，利用 Petri 网定义一系列活跃测量来处理在每次迭代中最有可能的分支。该解决方案的明显优势是它仅需要一小组连续运行的测量，来检测是否有故障。为了减少过程中引入的基本开销，仅根据需要执行额外的测量。

Heckerman 等人在 1995 年通过扩大 BN 的应用实现了以决策理论为基础的故障检测。该诊断过程不仅可以识别最有可能引起症状的根原因，还制订了完善这方面知识的计划，并采取行动修复。

6.3.6　预测

相比恶化检测和诊断，蜂窝网络中传统的手动故障检测中并没有恶化预测这一步。然而，它是与 SON 的自愈框架密切相关的，并提出了一些相关的恶化预测方法，因此对于未来的 3GPP 网络来说，恶化预测在故障管理中将起着非常重要的作用。

恶化预测有两个根本方法。一大类主要算法是基于传统的可靠性理论基础，但这些方法很少考虑动态系统的实际状态，因此它们没有能力反映不断变化的运行情况和故障过程。这些方法已被证明在长期平均可靠性设计和比较分析中是十分必要的。

随着计算机系统日趋复杂，考虑系统的实际状态（包括故障过程）对动态环境的预测已经必不可少。此目标可以通过在线时间故障预测方法来解决。因为对 3GPP 网络来说，在线故障预报方法在故障检测方面非常重要，所以本节对该方法进行了总结。

Salfner 等人在 2010 年总结了在线预报方法，并建立了一个有价值的领域分类。本节接下来将介绍他们的方法，向读者介绍这个研究领域。

恶化检测是庞大的主动故障管理系统的一部分，如图 6.13 所示。当对一个即将出现的恶化进行预测后，诊断过程将会被激活，以便找到预测问题的根源。根据预测和诊断结果，就可以安排并部署预防措施。主动故障管理能否成功和所有这些步骤都密切相关，这些步骤的每一步都代表了整个领域的研究成果。下面请看这条工作链上的第一个模块（即恶化预测）。

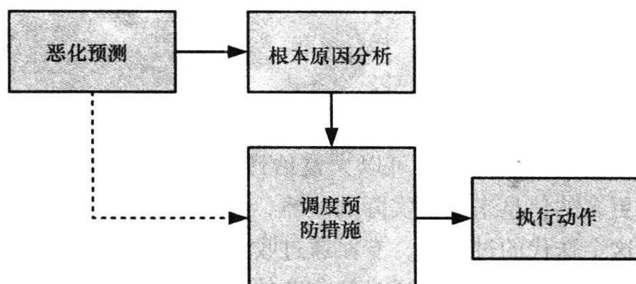


图 6.13　主动故障管理模块示意图

从实际角度来看，恶化预测是一个时间问题：预测主要是早期检测和（或）诊断。一个能够预测恶化的方法是基于它所发现的第一个恶化的迹象。因此不难想象，若在观测到的性能指标中没有迹象表明有故障，则无法预测是否有故障发生。但区分不同的预测方法仍然是合理的，因为需要运用不同的方法来完成不同的任务。

时间关系和预测的总体目标的描述如图 6.14 所示：性能监控系统提供的当前和过去系统的状态（数据预测窗口长度，t_{data}）有助于根据当前的潜在恶化迹象预测未来一段时间内（引导时间，t_{lead}）可能出现的情况。在一定的时间间隔（$t_{prediction}$）内，在预测期间的所做的预测是有效的。提高 $t_{prediction}$ 值有助于提高预测的精度。另一方面，如果预测时间太长，就会无法预测什么时候发生故障，故障预测也就失去实际意义了。因而需要引入最小预警时间（$t_{warning}$），即预测故障作出反应和准备的时间。故障预测方法的一个关键需求是引导时间必须大于最小的预警时间，除非在预测故障实际发生之前没有足够的时间做任何准备或预防措施。

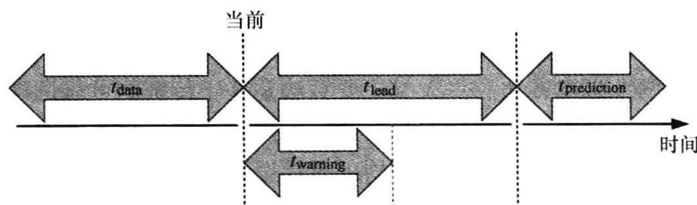


图 6.14　退化预测中的暂时关系

在本节的剩余部分，将会对恶化预测的主要方法进行阐述。

6.3.6.1　症状检测

需要有几种方法来监测和分析系统变量（如可用内存量），因为在系统陷入严重

的故障之前，某些错误会使系统恶化。下面主要介绍4种方法：

1. 逼近函数技术

可以对观测到的系统进行建模，将被测系统的变量作为输入，从而可以提供预期的输出。目标函数可以是故障发生的概率或一些计算资源（Andrzejak 和 Silva，2007；Hoffmann，2006；Abraham 和 Grosan，2005；Li 等人，2002）。

2. 分类器

直接分析系统变量和现状，以判断是否有故障倾向。决策边界据悉来自诊断案例的训练数据集，所以分类决定对这些参考案例来说都是已知的（Daidone 等人，2006；Turnbull 和 Alldrin，2003；Hamerly 和 Elkan，2001）。

3. 系统模型

能保存观测系统的正常（即无故障）操作知识，并根据实际的系统信息输出预期结果。然后将模型的输出与实际的系统输出进行比较，如果之间的差异超出了可接受的范围，就可以预测会有一个故障发生（Bod’ik 等人，2005；Kiciman 和 Fox，2005；Chen 等人，2002；Hughes 等人，2002；Ward 和 Whitt，2000；Singer 等人，1997）。

4. 时间序列分析方法

基于时间序列来处理系统变量，这样就可以基于一系列连续的测试样本进行预测。这种方法可以计算样本的残差并决定目前的情况是否出错，也可以预测基础变量的进展，以估计恶化出现的时间（Meng 等人，2007；Cheng 等人，2005；Crowell 等人，2002）。

6.3.6.2 检测错误上报

与症状监测方法不同，相当数量的方法都是基于事件运行的。这些方法基于故障预测和专家知识，其中故障预测可以上报有关错误的通知，而专家知识则将错误状态与未来故障相联系。不同于症状监测方法必须连续地处理输入变量，这些方法通常接收二进制输入，这些二进制输入反映了一定误差的存在或不存在。

基于规则的系统维持着这样一组 IF－THEN 规则，它们根据一些特定的条件（即一组一起显示出来的错误）映射到未来某些故障。不过面临的挑战是如何通过算法找到一些接近理想的规则，以涵盖所有可能的情况，同时不会产生太多的假故障警告（Vilalta 和 Ma，2002）。

为了提高基于规则的系统效率，可以采用其他方式来处理所观测现象和未来故障之间的联系。这一类方法利用模式识别技术，通过统计检验或分类，捕获错误和未来潜在故障之间的联系（Salfner，2006；Bai 等人，2005；Levy 和 Chillarege，2003）。

6.4 小区失效补偿

当一个小区或多个小区无法获得或无法操作时，就进入到了小区失效状态。就像前面章节所描述的，小区失效的原因可能是软件或硬件故障。但是出于节能的目的基站也会主动关闭，这种情形应在同一架构内予以考虑。小区失效会导致服务覆盖区域

的突然丢失，表现是网络质量下降，这样失去的利润会最终导致成本增加。因此，对小区失效的快速反应对宽带移动服务是至关重要的。需要注意的是，覆盖丢失是一个严重的问题，因为它的影响只能通过性能管理或故障管理数据（如掉话）部分地检测到。存在这样一种情形，当用户无法进行任何连接时［这种情况在可以通过 MDT 减轻（见第 7 章）］，用户可以在不连接状态先保存数据，然后把这些数据传递给网络。

发射功率和天线倾角优化是实现小区失效补偿（Cell Outage Compensation，COC）的经典方法。如果使用自适应天线，那么自适应天线的其他功能，如波束控制及波束成形，是补偿小区失效的好方法。而且在参考文献（Amirijoo 等人，2011）中，为了解决容量失效问题，HeNB 可以用来分流宏基站的业务流，也可以扩展宏基站的覆盖范围（见第 10 章）。宏基站的失效问题可以通过调整相应 HeNB 的无线资源管理参数来解决。

HeNB 对宏小区的过度干扰可以通过自适应调整 HeNB 的功率和频率带宽分配来降低。

因为人工上报变化情况是十分昂贵和消耗时间的，所以快速响应时间的自动解决方案可以用来补偿小区失效。

6.4.1　激活小区失效补偿

如 6.2 节和 6.3 节所示，基站故障可被检测和诊断。一旦基站无法通过远端方式修复故障，这个基站或单个小区将会关闭并将问题提交。值得注意的是，基站或小区也可以为了节能而关闭。在这两种情况下，当失效持续时间比较长时，小区失效补偿就会启动来补偿由于基站或小区关闭而影响的服务覆盖区域。

当 COC 功能触发后，问题基站的邻小区就有责任补偿，也就是激活以便恢复问题区域。运维人员在覆盖和容量之间采取性能折中策略可能会影响负责补偿的小区的选择或激活顺序。

6.4.2　小区失效补偿的方法

COC 的实现主要通过提高邻小区的发射功率或修改天线倾斜角以扩展覆盖范围。是否使用功率或天线倾斜角主要取决于系统中天线所具有的远端电调能力和基站使用的功率水平。也可以同时使用这两个功能：即功率和天线下倾角优化，比如可以先优先功率水平，然后再选择合适的天线倾斜角设置。

小区失效会导致服务无法获得，因此尽快从小区失效中恢复就显得非常重要。即使优化的结果并不是最优，只要动作足够迅速，就可以忍受新天线倾斜角设置的低准确性，这也就是为什么 COC 只是单步优化。COC 粗略优化之后的进一步优化可以由覆盖容量优化来完成。CCO 主要是基于性能管理数据来实现的。若想获得更多的有关 CCO 的信息，可以参看 5.4 节。

补偿小区失效最方便、快捷的方法是提高失效小区的邻居小区的发射功率。另一方面，通常基站在服务时，基站的传输功率已设置为最大可用功率水平。也可以进一

步采用调整天线倾斜角的方式，但是这会要求基站安装远端电调天线。

COC 分层结构如图 6.15 所示。基于所测试 KPI 的水平，可以有不同的方法来恢复服务质量。在这个安排中，当小区性能比最小的业务质量需求都好时，自优化将会在激活小区中优化业务质量。当业务质量低于最小业务质量需求，或从故障基站接收到故障告警时，COC 就会启动。当 COC 启动之后业务质量仍低于最小值时，那么 COC 会向工程师发出告警信息。

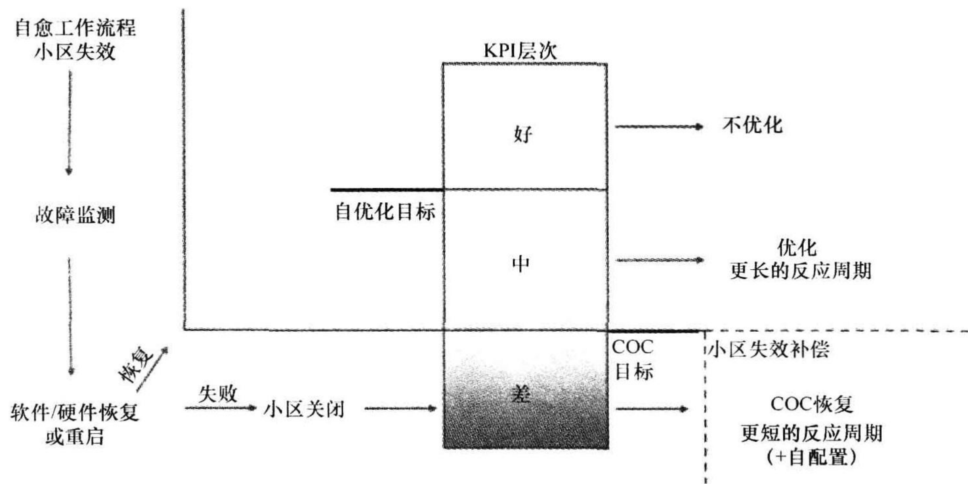


图 6.15 在 SON 功能中的 COC

举一个典型的小区失效场景。假设一个故障基站有 3 个扇区，可以举例 Helsinki 城区的仿真网路。仿真的 LTE 规范场景主要来自 Laiho 等人（2006）研究使用的 3G WCDMA 场景。考虑建筑、街道和水区域等因素后，将用户分布到仿真区。通过增加阴影衰落、快速衰落和天线配置的影响，在三个维度上模型化传播信道。传播信道需要加上传播损耗，并计算射线跟踪。Zheng 和 Xiao（2002）提出的快速衰落通过统计的求和正弦方法来建模。为了绩效评估 LTE 和 LTE - A（3GPP TR36. 814，2010），天线参数的建模和仿真都遵循 3GPP。5. 4 节主要描述了网络规划模型和仿真假设。5. 4 节的主要关注点是通过 SON CCO 的天线参数优化来实现覆盖和容量扩展。COC 的主要目标是在小区失效时能够提供令人满意的服务水平。因此，这个场景中需要引入一个 eNB 失效。

对于给定的 COC 场景，采用功率和倾角算法，主要包括以下 3 个步骤：

1）在图 6. 16 中，给出一个真实网络部署场景，此时网络工作正常。在这个场景中，通过优化功率水平来实现节能而基站不需关闭，因此不必使用最大功率。故障基站的覆盖区域用黑线标出。

2）在图 6. 17 中，其中一个基站发生故障，小区失效发生，在图中用白色标出。因此，邻居小区触发小区失效补偿。所有的邻居小区通过功率和倾角优化来实现补偿。举个例子，在补偿前，相关小区的覆盖区域由黑线标示。

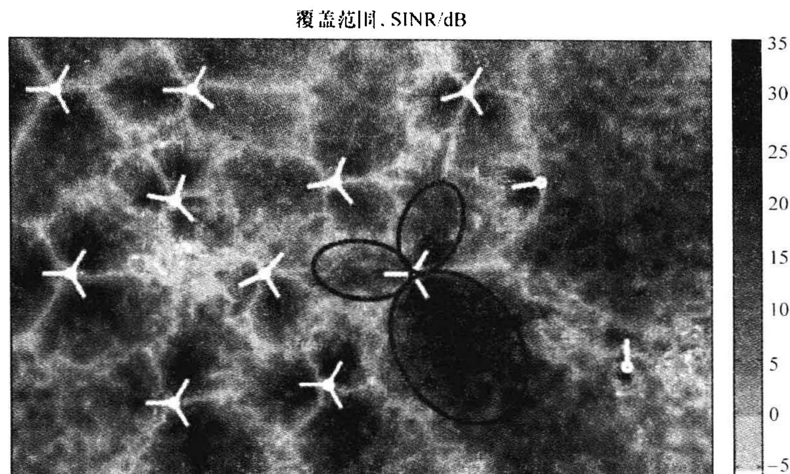


图 6.16　网络状态功能正常初始化（故障基站的覆盖区域用黑线标出，青灰色代表信号质量弱，比较黑的线代表比较强的信号质量）

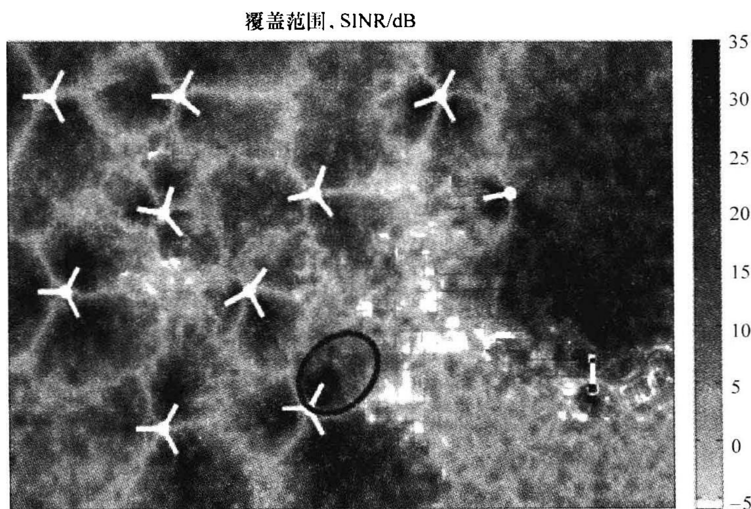


图 6.17　故障基站引起小区失效的产生（在图中，用白色区域代表覆盖漏洞，轻灰色区域代表低信号质量区域，黑线画出的区域为小区失效区域，其初始的覆盖补偿主要通过邻居小区的协同来实现）

3）在图 6.18 中，通过优化发射功率和天线倾角来实现小区失效补偿，邻居小区可以覆盖整个失效区域。补偿之后的覆盖区域就是之前用于补偿的其中一个小区。

通过小区失效补偿功能能够保证 LTE 服务覆盖区域内的服务质量和连续性。然而，COC 并不是在所有网络条件中都适用。在容量优化环境中，基站间的距离比较短。即使不改变邻居小区的配置，连续业务覆盖也是可能的。因此，优化措施，比如

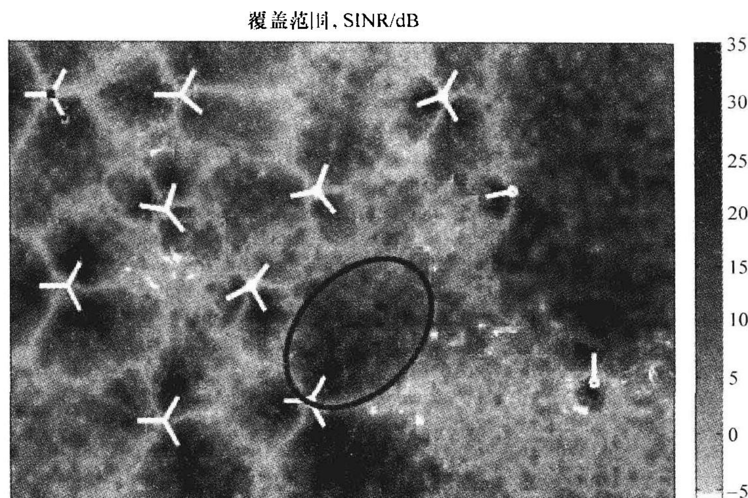


图6.18 优化发射功率和倾斜角来实现小区失效补偿（补偿后的覆盖区域用黑线来画出）

CCO，是一个比较合适的操作。另外，在覆盖限制场景，基站间的距离都比较大，可以采用最小或接近最小的倾角和最大功率水平，所以不会采用倾角和功率水平优化来做覆盖恢复。

6.4.3 小区失效补偿和自配置功能之间的协同

在LTE网络中，由于数目有限，物理小区标示（PCI）需要重复使用。当邻居小区覆盖故障小区的区域时，PCI可能会发生混淆或冲突，具体见4.2.2节。因此，小区失效补偿后需要检测PCI混淆或冲突。而且，需要更新和检查邻居关系列表以保证可靠的切换和服务连续性。为了解决这些以及相类似的问题，倾角改变后受影响的基站应该触发自配置功能。第9章将会描绘SON操作中的自配置功能。

参 考 文 献

3GPP TS32.541 (September 2010) *Telecommunication Management; Self-Organizing Networks (SON); Self-Healing Concepts and Requirements*, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), (Release 10).

3GPP TS32.762 (December 2010) *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) Network Resource Model (NRM) Integration Reference Point (IRP); Information Service (IS)*, (Release 10).

3GPP TS32.766 (December 2010) *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) Network Resource Model (NRM) Integration Reference Point (IRP); Solution Set (SS) definitions*, (Release 10).

3GPP TS32.522 (January 2011) *Self-Organizing Networks (SON) Policy Network Resource Model (NRM) Integration Reference Point (IRP); Information Service (IS)*, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), (Release 10).

3GPP TS32.526 (January 2011) *Self-Organizing Networks (SON); Policy Network Resource Model (NRM) Integration Reference Point (IRP); Solution Set (SS) definitions*, (Release 10).

3GPP TR36.805 (January 2010) *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Study on minimization of drive-tests in next generation networks*, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), (Release 9).

3GPP TR36.814 (March 2010) *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Further advancements for E-UTRA Physical layer aspects*, (Release 9).

3GPP TS32.410 (April 2011) *Telecommunication management; Key Performance Indicators (KPI) for UMTS and GSM*, 3rd Generation Partnership Project (3GPP), (Release 10).

Aamodt, A. and Plaza, E. (1994) Case-based reasoning: Foundational issues, methodological variations, and system approaches, in *Artificial Intelligence Communications*, Vol. **7** (1), IOS Press, Amsterdam. pp. 39–59.

Abraham, A. and Grosan, C. (2005) Genetic programming approach for fault modeling of electronic hardware. IEEE Proceedings Congress on Evolutionary Computation (CEC'05), Vol. **2**, Edinburgh, 1563–1569.

Amirijoo, M., Jorguseski, L., Litjens, T. and Schmelz, C. (2011) Cell outage compensation in LTE networks; Algorithms and performance assessment. IEEE International Workshop on Self-Organizing Networks, May, Budapest.

Andrzejak, A. and Silva, L. (2007) Deterministic models of software aging and optimal rejuvenation schedules. 10th IEEE/IFIP International Symposium on Integrated Network Management (IM '07), pp. 159–168.

Bai, C.G., Hu, Q.P., Xie, M. and Ng, S.H. (2005) Software failure prediction based on a Markov Bayesian network model. *Journal of Systems and Software*, **74**(3), 275–282.

Barco, R., Díez, L., Wille, V. and Lázaro, P. (2007) *Automatic Diagnosis of Mobile Communication Networks under Imprecise Parameters*, Series on Expert Systems with Application, Elsevier: Amsterdam.

Barco, R., Lazaro, P., Diez, L. and Wille, V. (2008) Continuous versus Discrete Model in Autodiagnosis Systems for Wireless Networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, **7**(6), 673–681. doi: 10.1109/TMC.2008.23.

Barco, R., Wille, V. and Diez, L. (2005) System for automated diagnosis in cellular networks based on performance indicators. *European Transactions on Telecommunications*, **16**(5), 399–409.

Barreto, G.A., Mota, J.C.M., Souza, L.G.M. *et al.* (2004) A new approach to fault detection and diagnosis in cellular systems using competitive learning. Proceedings of the VII Brazilian Symposium on Neural Networks (SBRN'04).

Bod'ik, P., Friedman, G., Biewald, L. *et al.* (2005) Combining visualization and statistical analysis to improve operator confidence and efficiency for failure detection and localization. IEEE Proceedings of International Conference on Autonomic Computing (ICAC 05), pp. 89–100.

Chandola, V., Banerjee, A. and Kumar, V. (2009) Anomaly detection: A survey. *ACM Computer Survey*, **41**(3), Article 15 (July 2009) 58. doi: 10.1145/1541880.1541882, http://doi.acm.org/10.1145/1541880.1541882.

Chen, M., Kiciman, E., Fratkin, E. *et al.* (2002) Pinpoint: Problem determination in large, dynamic internet services. Proceedings of 2002 International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN), IPDS track, pp. 595–604.

Cheng, F., Wu, S., Tsai, P. *et al.* (2005) Application cluster service scheme for near-zero-downtime services. IEEE Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation, pp. 4062–4067.

Chernogorov, F., Turkka, J., Ristaniemi, T. and Averbuch, A. (2011) Detection of sleeping cells in LTE networks using diffusion map. Proc. of the IEEE International Workshop on Self-Organizing Networks (IWSON), in conjunction with VTC 2011 Spring (May 15–18), Budapest.

Cheung, B., Kumar, G. and Rao, S. (2005) Statistical algorithms in fault detection and prediction: Toward a healthier network. *Bell Labs Technical Journal*, **9**(4), 1538–7305.

Crowell, J., Shereshevsky, M. and Cukic, B. (2002) *Using fractal analysis to model software aging*, Tech. rep. West Virginia University, Lane Department of CSEE, May, Morgantown, WV.

Daidone, A., Di Giandomenico, F., Bondavalli, A. and Chiaradonna, S. (2006) Hidden Markov models as a support for diagnosis: Formalization of the problem and synthesis of the solution. IEEE Proceedings of the 25th Symposium on Reliable Distributed Systems (SRDS 2006), Leeds.

EMC (2009) Automating Root-Cause Analysis: EMC Ionix Codebook Correlation Technology vs. Rules-based Analysis Technology Concepts and Business Considerations, A white paper from EMC (http://www.emc.com/collateral/software/white-papers/h5964-automating-root-cause-analysis-wp.pdf) [accessed 15 March 2011].

Hamerly, G. and Elkan, C. (2001) Bayesian approaches to failure prediction for disk drives, in *Proceedings of the Eighteenth International Conference on Machine Learning*, Morgan Kaufmann Publishers Inc.: Burlington, MA, pp. 202–209.

Heckerman, D., Breese, J.S. and Rommelse, K. (1995) Decision-Theoretic Troubleshooting. *Communication ACM*, **38**(3), 49–57.

Hoffmann, G.A. (2006) *Failure Prediction in Complex Computer Systems: A Probabilistic Approach*, Shaker Verlag: Aachen.

Hughes, G., Murray, J., Kreutz-Delgado, K. and Elkan, C. (2002) Improved disk-drive failure warnings. *IEEE Transactions on Reliability*, **51**(3), 350–357.

Khanafer, R.M., Solana, B., Triola, J. *et al.* (2008) Automated diagnosis for UMTS networks using bayesian network approach. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **57**(4), 2451–2461. doi: 10.1109/TVT.2007.912610.

Kiciman, E. and Fox, A. (2005) Detecting application-level failures in component-based internet services. *IEEE Transactions on Neural Networks*, **16**(5), 1027–1041.
Laiho, J., Raivio, K., Lehtimaki, P. *et al.* (2005) Advanced analysis methods for 3G cellular networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 4(3), 930–942.
Laiho, J., Wacker, A. and Novasad, T. (2006) *Radio Network Planning and Optimization for UMTS*, 2nd edn, John Wiley & Sons, Inc., New York.
Levy, D. and Chillarege, R. (2003) Early warning of failures through alarm analysis - a case study in telecom voice mail systems. ISSRE '03: Proceedings of the 14th International Symposium on Software Reliability Engineering, Washington, DC.
Li, L., Vaidyanathan, K. and Trivedi, K.S. (2002) An approach for estimation of software aging in a web server. Proceedings of the Intl. Symposium on Empirical Software Engineering, ISESE 2002. Nara, Japan.
Meng, H., Di Hou, Y. and Chen, Y. (2007) A rough wavelet network model with genetic algorithm and its application to aging forecasting of application server. IEEE Procedings of International Conference on Machine Learning and Cybernetics. Vol. 5.
Montani, S. and Anglano, C. (2006) Case-based reasoning for autonomous service failure diagnosis and remediation in software systems. Proc. European Conference on Case-Based Reasoning (ECCBR) 2006, Lecture Notes in Artificial Intelligence, pp. 489–503.
Mueller, C., Kaschub, M., Blankenhorn, C. and Wanke, S. (2008) A cell outage detection algorithm using neighbor cell list reports. In K.A. Hummel and J.P.G. Sterbenz (eds.), *IWSOS 2008, LNCS5343*, 218–229.
Neapolitan, R.E. (2004) *Learning Bayesian Networks*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
Nováczki, S. and Szilágyi, P. (2011) Radio Channel Degradation Detection and Diagnosis Based on Statistical Analysis. IEEE International Workshop on Self-Organizing Networks, May, Budapest.
Rao, S. (2006) Operational Fault Detection in cellular wireless base-stations. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 3(2), 1–11.
Salfner. F. (2006) Modeling event-driven time series with generalized hidden semi-Markov models. Tech. Rep. 208 *Department of Computer Science*, Humboldt-Universität zu, Berlin. Available at http://edoc.hu-berlin.de/docviews/abstract.php?id=27653 [accessed 15 March 2011].
Salfner, F., Lenk, M. and Malek, M. (2010) A survey of online failure prediction methods. *ACM Computer Survey*, **42**(3), 42. doi: 10.1145/1670679.1670680, http://doi.acm.org/10.1145/1670679.1670680.
Singer, R.M., Gross, K.C., Herzog, J.P. *et al.* (1997) Model-based nuclear power plant monitoring and fault detection: Theoretical foundations. Proceedings of Intelligent System Application to Power Systems (ISAP 97). Seoul, pp. 60–65.
Turkka, J., Ristaniemi, T., David, G. and Averbuch, A. (2011) Anomaly Detection Framework for Tracing Problems in Radio Networks. Proc. of the IARIA Tenth International Conference on Networks (ICN), St. Maarten, January 23–28, Netherlands Antilles.
Turnbull, D. and Alldrin, N. (2003) *Failure Prediction in Hardware Systems*, Tech. rep, University of California, San Diego, available at http://www.cs.ucsd.edu/~dturnbul/Papers/ServerPrediction.pdf [accessed 15 March 2011].
Van den Berg, J.L., Litjens, R., Eisenblätter, A. *et al.* (2008) *SOCRATES: Self-Optimisation and self-ConfiguRATion in wirelESs networks*, COST 2100 4th MCM, February 6–8 2008, Wroclaw.
Vilalta, R. and Ma, S. (2002) Predicting rare events in temporal domains. Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Data Mining (ICDM'02), Washington, DC, pp. 474–482.
Varga, P. and Moldovan, L. (2007) Integration of Service-Level Monitoring with Fault Management for End-to-End Multi-Provider Ethernet Services. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, **4**(1), 28–38.
Ward, A. and Whitt, W. (2000) Predicting response times in processor-sharing queues, in *Proc. of the Fields Institute Conf. on Comm. Networks*, (eds P.W. Glynn, D.J. MacDonald and S.J. Turner, *Fields Institute Communications 28*, American Mathematical Society, Providence, RI, pp. 1–29).
Wietgrefe, H., Tuchs, K.D., Jobmann, K. *et al.* (1997) Using neural networks for alarm correlation in cellular phone networks. International Workshop on Applications of Neural Networks to Telecommunications (IWANNT), pp. 248–255.
Yilmaz, O.N.C., Hämäläinen, S. and Hämäläinen, J. (2011) *Optimisation of Adaptive Antenna System Parameters in Self-Organizing LTE Networks* (submitted to Wireless Networks), Springer Journal.
Zanier, P., Guerzoni, R. and Soldani, D. (2006) Detection of Interference, Dominance and Coverage Problems in WCDMA Networks. IEEE 17th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 11–14 September 2006, pp. 1–5.
Zheng, Y.R. and Xiao, C. (2002) Improved models for the generation of multiple uncorrelated Rayleigh fading waveforms. *IEEE Communications Letters*, **6**(6), 256–258.

第7章 支撑功能：最小化路测（MDT）

Malgorzata Tomala、Ilkka Keskitalo、Gyula Bodog 和 Cinzia Sartori

7.1 背景介绍

7.1.1 概述

路测是运营商网络向新技术演进的常用手段。路测的目的是监测和评估移动网络的性能。常用的路测方法包含一系列手动控制的步骤。通常情况下，执行路测时，测试工程师需要使用专门改造的路测终端捕获与测试呼叫有关的测量和相关事件过程。最简单情况下，测试人员需要携带支持网络监控功能的手机，然而实际中的路测需要使用配备了测试终端、测量设备和额外工具的测试车辆（见图7.1）。测试终端需要支

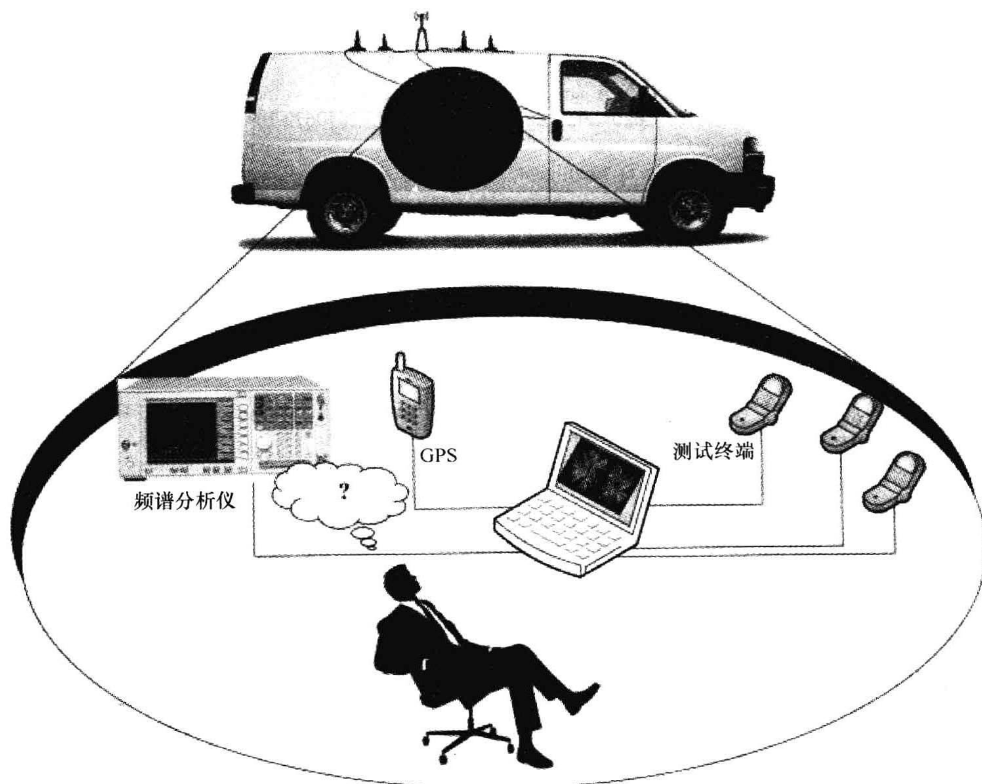


图7.1 装备路测设备的路测车辆

持多种功能及不同的传输技术以提供差异化测试结果。这种测试终端通常集成了 GPS 接收机来获取终端的坐标，并记录终端的位置。有些终端安装在车辆顶部，连接到车顶不同方向的高灵敏度天线上，以感知不同的信号。此外，终端还包括一系列辅助工具，如网络参数测量仪、频谱分析仪和具有本地维护功能的笔记本电脑。

有了上述测试配置，运营商的测试车辆可以在不同地点沿任意路线行驶进行路测，例如，在典型城区和郊区站点、校园或公共街道等。测试车辆在执行路测过程中，可以检测并记录指定地理区域内多种物理和虚拟网络服务参数。测试过程的中间结果，也就是存储在数据库日志文件中的测量数据，通常为需要进一步分析的海量数据。测量结果研究的以及路测结果与发射小区的关联过程很可能十分繁琐，但对于路测来说，这是必不可少的。根本原因的分析有助于确定解决问题的正确方法。

因此，路测过程中运营商可以收集适当的统计数据，进行网络设计验证，并进一步识别和归类网络中的覆盖及质量问题。路测车辆经过任意指定区域都能对当前网络条件进行测量，这样可以获得与实际用户体验结果相似的真实数据。从用户的角度来说，获得精确的基站覆盖区域和信号强度地图是非常有用的，这也正是运营商迫切需要的。通过对网络条件的勘测，运营商可以得知网络的覆盖盲点，有效更改网络配置，为用户提供更好的覆盖和服务。

运营商对网络质量的持续监测和改善主要依赖于路测，但传统的路测方法仍然存在诸多不便。除了昂贵的专业化测量设备外，执行过程还需支付给承包商、路测服务和方案提供商、设备许可证等额外的费用。此外，路测过程还牵扯到人力资源和路测本身所需的工作。路测结果的进一步处理也可能需要很长的时间。因此，整个过程需要耗费大量的财力和人力。

路测也常用于运营商之间的竞争力分析。因此，路测技术的进步将使运营商真正受益，有助于降低网络的探测成本。基于这些原因，许多针对传统路测方法的改进工具正在为运营商所采用，如在出租车上安装自动测量装置等。具备自动化数据采集能力的测量设备可以为运营商提供后续人工处理的结果，由于出租车频繁穿梭于运营商的服务小区之间，测试工程师就不必亲自参与这片区域的路测和监视过程。然而，这种简化方式也没有真正解决所有的问题，路测业务成本仍然居高不下，额外的二氧化碳排放也并不环保。

另一个重要方面是路测的现行做法通常在道路上进行，可能无法向运营商提供室内覆盖环境下用户体验的信息。

因此，这也推动着需求的不断创新。3GPP 标准化进程也已经考虑了路测演进背后的诸多因素。随着 LTE 的出现及其大规模商业部署的到来，开发自动化的解决方案（包括商用终端）逐渐成为人们的诉求。自动化的解决方案可以为运营商提供网络覆盖范围内无线网络故障检测和优化所需的全部可能测量。最终目标是：通过引入 R10 的新特性来降低网络管理成本。

本章集中阐述了 3GPP 标准中有关路测演进的技术定义，即最小化路测（MDT）功能，介绍了 MDT 的概念、用例、UMTS/HSPA 和 LTE 技术中的测量和过程以及 R11 的标准进展和计划。

7.1.2 历史和背景

值得强调的是，在详细讨论技术实现前，路测的主要因素给出了进一步工作的假设的起因，协助人们理解技术需求所在和解决方案的出处。

回顾3GPP 最小化路测项目的启动，是在 RAN（无线接入网）和 SA（系统架构）技术规范组之间最早开展的。随着 NGMN 论坛（Lehser，2008）上路测的自动化作为运营商的需求成为网络部署的当务之急，参加 3GPP 的运营商也将该课题带至 3GPP。3GPP 组织认可了该课题的必要性，并为其建立了一个框架，来定义最小化路测的用例、要求和解决方案。

从高层角度看，最小化路测的概念就是，一种利用 UE 的测量能力来增加 O&M 侧网络状态的可用信息的解决方案，降低了运营商对人工路测的依赖。最终用户的参与以及发送给 O&M 系统实地测量的都是透明的，因此在最开始的讨论中，这两个端点之间的传输机制并不明晰。

为了在路测数据采集演进中清晰化用户的参与，3GPP TSG RAN 工作组建立了一个研究项目，充分洞悉无线接口和 UE 的功能，项目最终启动以：

1）确定最小化路测的用例及需求；

2）研究定义新的 UE 测量记录和 UE 上报能力的必要性；

3）分析对 UE 的影响并给出新功能开发建议。

在研究阶段，一度产生了两种架构建议：

1）用户面架构（见图 7.2）；

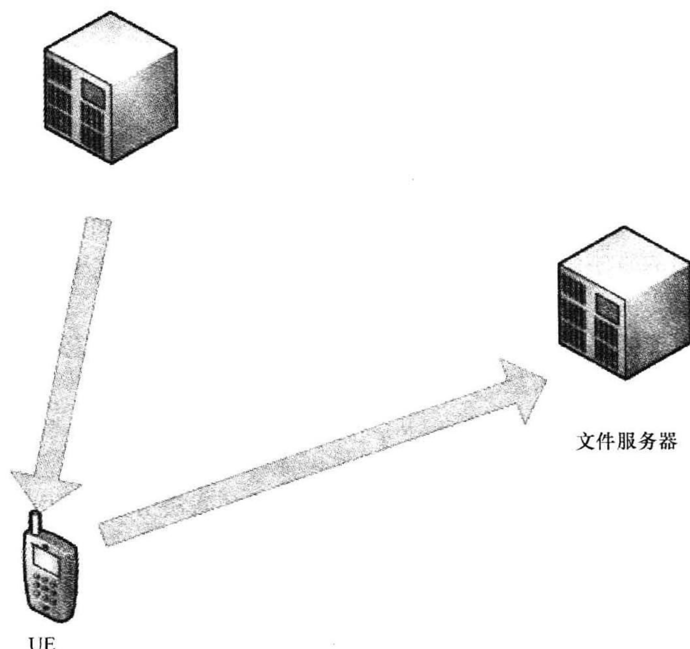


图 7.2　用户面架构

2）控制面架构（见图 7.3）。

3GPP TSG SA 5 工作组在 3GPP TR32.827（2010）中对这两种架构进行了研究。

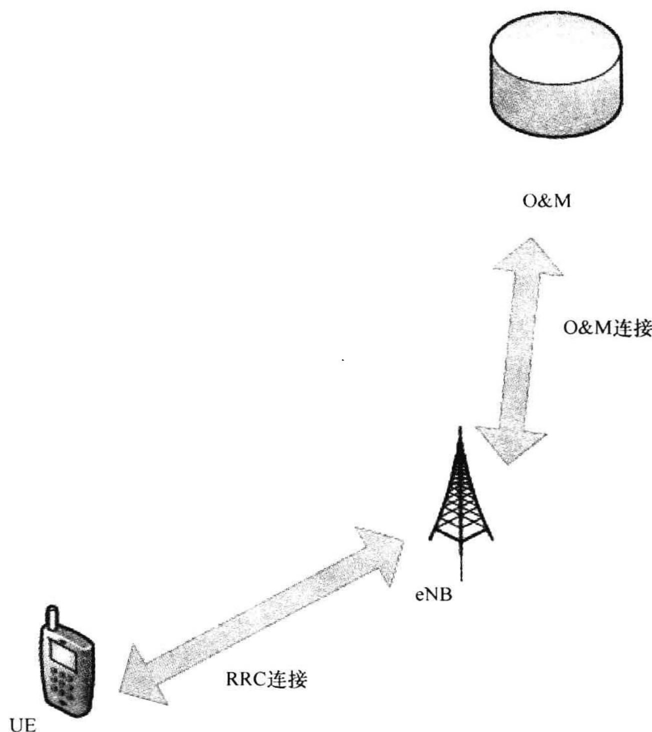


图 7.3　控制面架构

在用户面架构中，UE 是利用 OMA 定义的设备管理功能进行配置的。UE 测量数据的上报是通过建立一个正常的到特定服务器的数据连接完成的。在这个架构模型中，有关 UE 测量收集的策略控制不涉及接入网，相关配置和上报流程在文件服务器和 UE 之间直接终止，因此接入网中 UE 的报告是作为用户面数据来传送的，测量数据通过透明传输方式传送至无线接入网及核心网。

在控制面架构中，运营商的 O&M 系统控制测量数据的收集和上报策略，eNB/RNC 通过 RRC 连接对 UE 进行配置。UE 通过 RRC 将测量上报回 eNB/RNC，然后 eNB/RNC 通过 O&M 连接将 UE 测量数据发送至 O&M。这种方法允许 eNB/RNC 侧完成 UE 测量数据的收集，并将其与 eNB/RNC 中已有的结果相结合，再转发给 O&M 系统。

研究项目（Study Item，SI）的阶段进展表明，将每个物理位置的 UE 测量与无线接入网侧的可用信息相结合对高效的网络优化是有益的。传输机制的检验进一步明确了控制面解决方案是可行的，该解决方案可以从设备处获取信息。这些结论已在 3GPP TR36.805（2009）中记载，并就基于控制面架构的具体解决方案开展进一步工作达成一致。

因此，在最初的需求阶段确定了 MDT 的目标后，3GPP TSG RAN 和 SA 工作组成

立了两个并行的工作项目。TSG RAN 工作组已开始考察 UE 和底层网络尤其是空中接口侧执行 MDT 功能的情况，与此同时，3GPP TSG SA 工作组也推动了 MDT 管理相关工作。

7.2 与 SON 的关系

自组织网络着眼于自适应地网络维护及网络优化时减少人工干预。如何高效地实现网络性能，尤其在面对日益复杂的网络环境时，SON 的作用无疑是至关重要的。

SON 和 MDT 的目标都是减少运营工作量，提升网络性能、质量，同时降低维护费用；这两种技术对网络优化都是非常有帮助的，并且可以独立应用。

从 SON 的机制来看，网络自身会基于一定算法来决策优化并进行自动调整参数。算法的输入是根据运营商策略预定义好的阈值，通过输入来触发网络决策，从而达到减少人为干预的最终目的。

SON 和 MDT 之间的主要区别如下：

1）SON 以即时/自动处理中短期网络问题为目标，而 MDT 更多的是收集测量值来做进一步的分析和处理（手动或自动）。

2）用例的适用范围：SON 包括自配置、自优化和自愈，而 MDT 主要集中于优化。

不同的 SON 用例对应于网络运营的不同阶段，如初期部署和早期运营阶段、高负荷和网络成熟阶段。一般情况下，早期阶段，有关自配置和覆盖的用例是最为重要的，而随着网络使用量的增加，有关质量和能力的用例逐渐凸显。

在网络建设初期，如试运营阶段的优化、新设备（如 3G 或 LTE）的初期部署，尤其需要进行大量路测。很显然，运营商提出了一种新的技术需求，来检查一个新的无线通信网络的服务情况，并在商业部署前通过试验验证射频结构。目前，为了使新部署网络的数据吞吐量和传输质量达到可以接受的标准，通常要反复地进行路测，以便对网络做一些必要的修改。网络优化工程师对网络应采用何种优化方案拥有决策权。方案调整后，进入另一个重复的监测周期，来核实问题是否已经解决。图 7.4 给出了决策流程图。通过在规划阶段到新建网络验收阶段的路测评估，就可以引入一个初步优化、功能齐全的网络了。

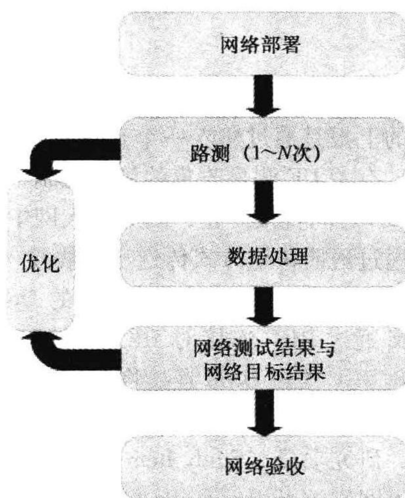


图 7.4 网络验收过程

有了 MDT 流程，上述验收过程通过自动化输入得到了增强，完成正常验收；UE 也会正常驻留和连接到网络，遇到问题时，为进一步优化网络 UE 的测量会被收集起来，并（自动）进行后处理。

上述流程也能够用于优化成熟的网络（例如，验证外场参数变化，解决特定区域或工程问题），因此 MDT 不仅能使网络在试运营阶段受益，也可以在配置及优化阶段做很好的补充。

UE 通过 MDT 的方式上报测量结果很可能是出于无线优化的目的，但 MDT 并不包括任何像 SON 那样的自动化处理过程。另外，SON 和 MDT 两者是相互独立的，如运营商可能决定不部署 SON 的功能，但仍然希望减少人工测试。

这两种方案能够独立工作，但两者的结合将会强有力地增强终端用户性能，改善整体网络操作。

7.3 要求

在详细阐述终端侧实现新的测量和数据记录取代传统路测的可能性之前，有必要建立 MDT 的高层要求。通过传统终端来实现最小化路测，将很大程度上需要依赖 GNSS 定位的使用，同时对后续终端的影响也需要进行慎重考虑，这对保护终端实现的可行性以及低成本终端都很重要。因此，在定义新的测量和相关流程时，需要考虑新功能带来的所有直接和间接的影响。有观点认为，新的要求列表应至少包括 UE 的复杂度、功耗和用户体验等相关问题。因此，3GPP 就一系列 MDT 功能定义的原则和要求达成了一致，这在很大程度上是功效和 UE 影响之间的权衡。

3GPP TS37.320（2011）协议定义了 MDT 开发的基本要求，分为以下 9 个方面：

1. MDT（上报）模式

该要求介绍了关于 UE 状态的分裂。MDT 的测量上报有两种模式：非即时或即时上报。UE 在 RRC_IDLE（UTRA 中是 CELL_PCH/URA_PCH）状态时可以配置为 Logged MDT（非即时 MDT），也就是初始化为 Logged MDT 的 UE 将不支持即时上报，而将支持非即时上报触发。UE 在 RRC_CONNECTED 状态时可以配置为 Immediate MDT（即时 MDT），即实时上报，也就是说在这种情况下大部分测量结果都是 UE 通过 MDT 消息立即发送的。

2. UE 测量配置

在空中接口资源的使用上，UE 通常会提供无线测量作为无线资源管理（RRM）的输入。RRM 功能是确保无线资源高效使用的常用程序。MDT 测量必须符合正常的 UE 操作。因此，需要指出，出于正常的 RRM 目的，应将 MDT 测量配置从网络配置中独立出来。然而，测量结果的可用性仍然一定程序地依赖 UE 的 RRM 性能。

3. UE 测量收集和上报

MDT 的测量报告可能包含随时间变化的多个事件及测量。MDT 解决方案的标准化过程，随着 MDT 上报模式的不同而有不同的解释：

1）对于 Immediate MDT，一个测量触发有可能配置若干个实例。因此，当满足预配置的触发条件时，UE 立即上报无线测量情况。

2）对于 Logged MDT，有可能只配置周期性触发。预定义的周期定时器超时，UE 存储当前时间点的无线测量情况，以便后续上报。为了降低测量上报对终端耗电的影

响和网络信令的负担，测量收集的时间间隔和上报的时间间隔是分开记录的。

4. 地理范围

对目标区域（如问题区域）进行路测记录是运营商日常维护工作的一部分。有了 MDT 配置，就能够按照 TMS 的方法，配置需要进行测量收集的地理位置区域。

5. 位置信息

很大一部分人工路测数值都源于 GPS 定位的使用，并且常常所有的路测都依赖于卫星定位，如 GPS。因此，最小化路测的解决方案也要求测量结果提供可用的位置信息或其他可以获知 UE 位置信息的测量。GPS 接收机的存在并不一定保证为 MDT 及预期的测量提供精确可用的 GPS 定位，并且目前也没有对定位方式绝对精度的要求。但需要注意的是，实际情况下 UE 位置的获取都是假定以尽力而为的方式在 MDT 测量结果上打上标签的，也就是说，在没有 GPS 定位的情况下，可以使用小区标识来粗略地定位问题小区（详见 7.7.5 节）。

6. 时间信息

为了在后续处理中查看 MDT 报告，时间信息是非常重要的。每次测量时生成并保存一个时间戳来指示测量时间，以便跟踪测量数据、并为业务条件提供参考依据。因此，MDT 相关测量应与时间信息相关联。对于非实时上报的方式，测量记录中应包含 UE 生成的时间戳标记。对于实时上报的方式，网络侧也应包含相应的时间信息。

7. UE 能力信息

网络需要选择合适的终端执行 MDT 测量。因此，网络侧需要请求获取终端能力，这样网络可以仔细选择合适的 MDT 测量终端，如支持全球导航卫星系统（GNSS）定位或记录功能的终端。由于即时上报方式不只应用于 MDT 功能，因此 Immediate MDT 对终端没有特殊的能力要求。

8. 对 SON 的依赖

正如 7.2 节中提到的，MDT 和 SON 功能是协同作用的。SON 功能以及其他优化实体可以通过已定义的接口使用 MDT 收集的信息。然而，在网络中，MDT 解决方案应能够独立于 SON 工作。而在 UE 端，MDT 测量和 UE 侧 SON 的测量应尽量采取功能重用的方式。

9. 对 TRACE 的依赖

MDT 功能可以重用现有的 trace 功能。因此，MDT 有两种可以重用和扩展的跟踪技术。如果 MDT 在一个确定的 UE 侧发起（如基于 IMSI、IMEI - SV），则将采用基于信令的跟踪过程，否则将采用基于管理的跟踪流程。

在定义新的要求时，尤其要慎重考虑要求本身对用户和终端的影响。因此，MDT 解决方案除了要考虑要求列表外，还应考虑 3GPP TS37.320（2011）的以下限制：

1. UE 测量记录

UE 测量记录机制是一项可选功能。为了限制对 UE 功耗的影响，MDT 应根据网络侧 RRM，充分利用 UE 侧执行的测量。因此，测量记录功能应尽可能使用现有的可用测量。

2. 位置信息

位置信息的可用性由 UE 能力和/或 UE 的实现决定。当触发 UE 的测量时也应考虑同时获取有效的位置信息，在获取位置信息时，GNSS 接收器通常应该提前启动，并在足够长的一段时间内一直保持开启状态。不过这很可能导致严重的终端功耗问题。因此，详细位置信息的解决方案，也应考虑运行定位系统时 UE 的功耗。

7.4 功能用例

从本质上讲，驱使 MDT 发展很重要的一方面是 UE 能够自动收集无线网络性能方面的相关信息。然而在功能要求的描述中，也列出了一系列用例来说明一些可能的场景，这些可预知的解决方案有助于实现最小化路测。后续章节也将给出部分用例，体现了 MDT 能够为网络部署的验证和优化提供有用信息的潜能。在大多数情况下，实际的 MDT 解决方案是开放的。3GPP R10 版本（3GPP TR32.827，2010；3GPP TS36.331，2011）中定义的解决方案仅仅关注覆盖优化的用例。将来的版本将主要评估余下的用例。

7.4.1 运营场景

3GPP TR36.805（2009）概述了运营商执行路测的主要场景：

1. 新基站部署

建立新站点是路测的一种典型应用场景，路测可以验证服务是否激活。兴建或扩建网络时，路测可以确保新基站高效安装和调试。事实上，新基站的部署意味着传输首先在“测试模式”激活。路测会收集测试区域内新小区及邻区的上下行覆盖测量。基于初步的测试结果，运营商可以在优化网络覆盖和质量的范围内，对小区进行粗略调整［如物理改变天线的倾角和方位角或更改某些参数的设置，如发射功率（TX power）］。初步调整后，新小区的商用服务就可以启动了。不过，服务启动以后，网络就会保持在“激活状态”，并随着流量状况、新建站和软件升级等情况进行调整。因此，路测在预定小区继续收集更广泛的覆盖/吞吐量测量，从而确保网络能够提供良好的服务，并能进行一些细微的调整（如基于参数）。

新基站的部署是一个旨在维持网络高性能的持续而长期的过程。随着新的部署场景或新无线接入网元（如 femtos、picos、远程无线电接入）的引入，运营商的网络覆盖或多或少会受到些影响，此时路测将变得更加重要。

2. 新建的公路/铁路/主要建筑物

采用事件驱动的方式在特定区域进行路测属于额外的网络监测。

高速公路或建筑物的新建意味着网络流量的增加。而且大的障碍物通常会产生无线网络的覆盖阴影，使这个区域内信号变弱。因此，每当兴建新的公路/铁路/办公楼时，收集周围网络性能快照也是很重要的。运营商要在相关区域进行路测，来查看网络流量变化是否需要改善上下行覆盖或扩容，或者是否有必要加强室内业务。如果需要改善覆盖，则运营商可能会对流量较高的地区进行扩容，或者部署新的小区、调整

现有小区的参数设置、安置新的站点等。在采取这些相应措施之后，要检验小区覆盖是否真的提高到预期水平，就需要进行额外的验证，也就是执行新一轮路测。

3. 客户投诉

客户投诉是在特定小区采用事件驱动方式路测的另一种情况。需要执行路测的区域位置，取决于用户对网络服务的投诉。用户在遭遇质量较差的语音或数据服务时，向运营商指出这些问题，运营商就在相关小区进行路测，检验网络下行覆盖和业务质量。基于用户反映的信息，运营商可以了解网络问题所在，明确影响用户感知的原因和具体情况。如果有必要改善覆盖，则运营商会采取相应的措施。因此，路测有助于运营商为用户提供高品质的服务。

4. 周期路测

监测成熟网络的业务承载量是十分必要的，也是运营商的惯用做法（如核对外场参数变更、在特定区域和交换项目中解决问题）。通过常规的方式在特定的小区进行的路测，反映了网络的实际性能，并确定需要改进的小区。因此，正如前面提到的，一旦站点满负荷运作，就可以进行路测。重要的是运营商定期进行路测，以便对网络覆盖范围和吞吐量水平有新的了解。路测检测出的任何问题都必须及时进行调查和校正。

不同的网络运营阶段，运营商执行路测的场景也有所不同。显然，如果路测相关测量能由商用终端设备来收集，那么依据 MDT 架构就可以一定程度上减少现有路测工作，从而显著地降低网络维护成本。此外，通过商用终端来收集测量还可以帮助运营商收集到传统路测无法到达的地区的测量（如狭窄的街道、非公共场所、私人住宅或其他室内区域等）。

基于上述原因，下面章节中讨论的用例已明确了 MDT 解决方案的范畴，针对不同的优化目的划分了不同的场景。

7.4.2 覆盖优化

覆盖是反映网络性能和终端用户体验的基本因素之一。原则上，覆盖也是评估网络服务等级的关键因素，同时又是用户评价不同运营商网络服务的重要指标。因此，了解自身网络上下行覆盖情况、找出覆盖相关问题的根源，对运营商来说是至关重要的。无线覆盖相关测量对提升网络性能（如网络规划）、网络优化和 RRM 参数优化等，具有不可估量的作用。因此，覆盖优化是网络维护中最重要的用例，在定义 MDT 解决方案时具有最高的优先级。

在覆盖优化方面，运营商对 MDT 测量的主要兴趣，在于为优化需要获取可靠的覆盖地图。然而，检测亟待解决的覆盖问题时也可能用到覆盖监测的统计数据。因此，可将覆盖测量和验证分为以下子用例：

1. 覆盖映射

基于信号强度的覆盖地图可以使运营商清楚地了解到网络提供的服务水平。为了使覆盖地图可视化，需要洞察小区范围内每个物理位置的信号电平。这也意味着需要收集网络中所有位置的测量，而不仅仅是有潜在覆盖问题的区域。因此，运营商应该

收集现网 UE 信号电平和/或质量的统计数据，并且要在不同的小区、不同网络负载情况下进行收集。有了这些信息，就可以对小区内甚至整网的服务水平分布有了基本的了解。图 7.5 给出了一个覆盖地图的示例。

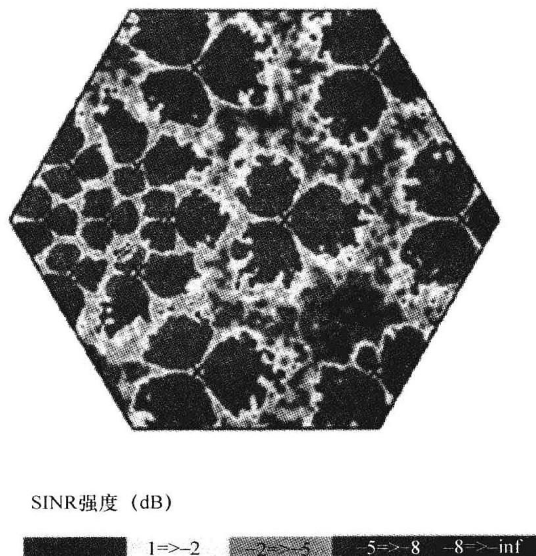


图 7.5　覆盖地图

2. 覆盖漏洞检测

尽管有了前期的网络规划，但仍然有可能存在一些小区由于 UE 未收到足够强的下行信号而造成明显的业务中断。一些物理障碍如新的建筑、山丘等，以及不合适的天线参数或射频规划不足等原因也可能会导致服务小区及邻区的信号电平低于基本服务水平，这种情况称为覆盖漏洞。覆盖漏洞下的 UE 很可能会发生掉话和无线链路失败，因此鉴别出网络中的覆盖漏洞是必不可少的网络维护步骤，以便对网络重新进行规划，做出必要的调整。发现并最终消除蜂窝网中的覆盖漏洞，使得整个网络提供良好的无缝服务。图 7.6 给出了一个覆盖漏洞的示例。

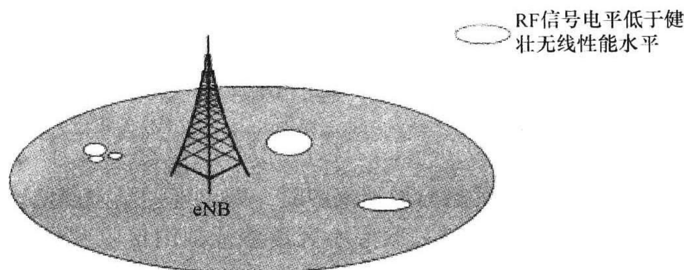


图 7.6　覆盖漏洞

3. 弱覆盖的鉴别

当服务小区的信号电平低于规划的性能要求水平时，称为弱覆盖。信号电平最弱的区域，以及保持连接或执行切换最容易遇到问题的区域，都可以通过 UE 接收信号

电平低于阈值来识别。UE 接收信号电平这项信息应该能反映出最弱信号电平值的位置，并且能够提示该位置存在切换失败、掉话或数据吞吐量下降等风险。因此，相关统计数据的收集应限于服务小区信号电平低的区域，避免不必要的 UE 牵涉进来。图 7.7 给出了一个弱覆盖的示例。

4. 过度干扰的检测

过度干扰可能是由小区间重叠覆盖区过大或网络规划阶段未进行规划的非预期的小区信号泄露所致。过度干扰会降低网络容量，在业务负荷较高时尤其明显。典型情况下，UE 所在服务小区的信号电平较强，同时伴随来自邻小区的强干扰，导致较差的链路质量和用户体验。数据采集的主要目的就是从出现问题的小区获取样本。图 7.8 给出了一个导频污染的示例。

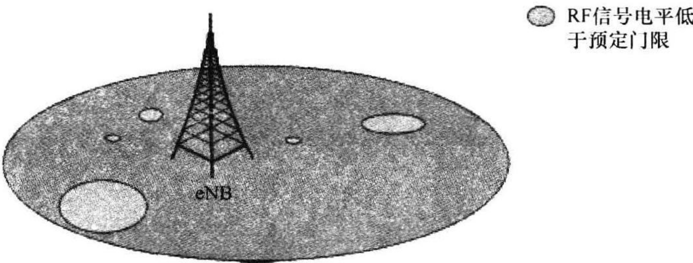


图 7.7　弱覆盖

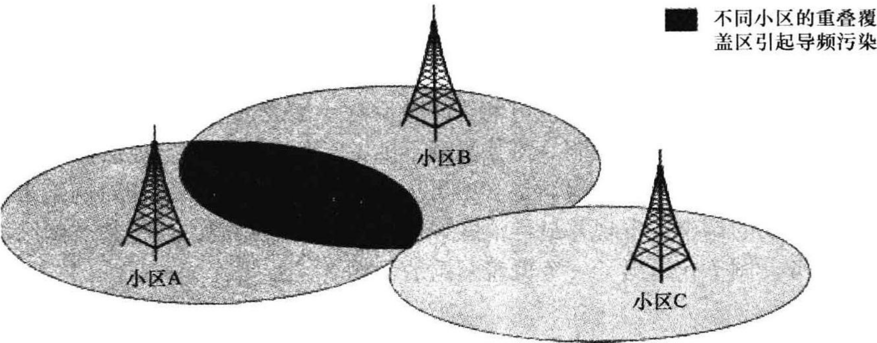


图 7.8　导频污染

5. 过覆盖检测

当一个小区的覆盖范围远远超出规划范围时，即出现过覆盖现象。过覆盖可以理解为邻区的“孤岛”覆盖，也就是在服务小区覆盖范围内接收到较强的邻区信号的情况。邻区信号可能来自位置相邻的小区，也可能来自一个更远的小区。UE 会在某个特殊的位置遇到与小区重叠覆盖类似的情况。当 UE 在服务小区覆盖范围内收到较强的邻区信号时，在搜集足够的服务小区信号和邻区干扰信号统计数据后，再进行过覆盖或孤岛覆盖的检测会比较有效。图 7.9 给出了一个过覆盖的示例。

6. 上行覆盖检验

网络的上行覆盖性能也很容易被用户察觉，Holma 等人（2010 年）讨论了上行覆盖所依赖的诸多因素。较差的上行通信可能会造成呼叫建立失败、掉话、上行语音质量差等结果，影响用户体验。上行覆盖链路和下行覆盖链路应该保持对称。理想的情况下，上行覆盖区域应该与下行覆盖区域相同，然而实际安置的基站可能会遇到上行和下行链路预算不一致的情况，一般下行链路覆盖要好于上行链路。为了做好上行覆盖的预测，UE 端监测上行发射功率电平也是至关重要的。

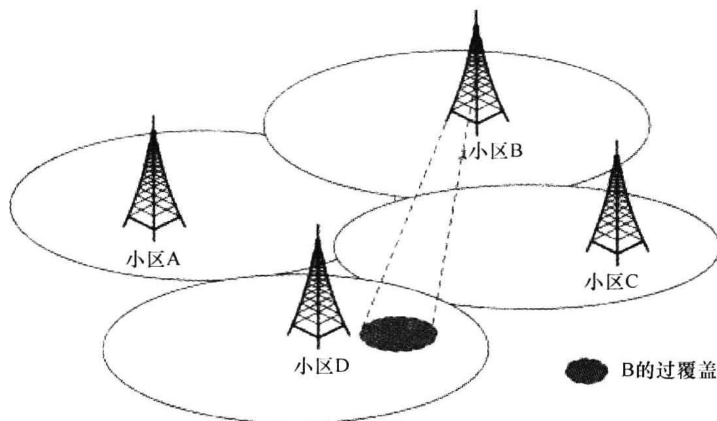


图 7.9　过覆盖/孤岛覆盖

上行覆盖优化不仅要改变站点配置（天线）来改善蜂窝网络覆盖，也要在不同环境中优化上行发射功率，调整参数设置，还可以通过改善上行接收机的性能，使上下行覆盖趋于平衡。图 7.10 给出了一个上下行覆盖不均衡的示例。

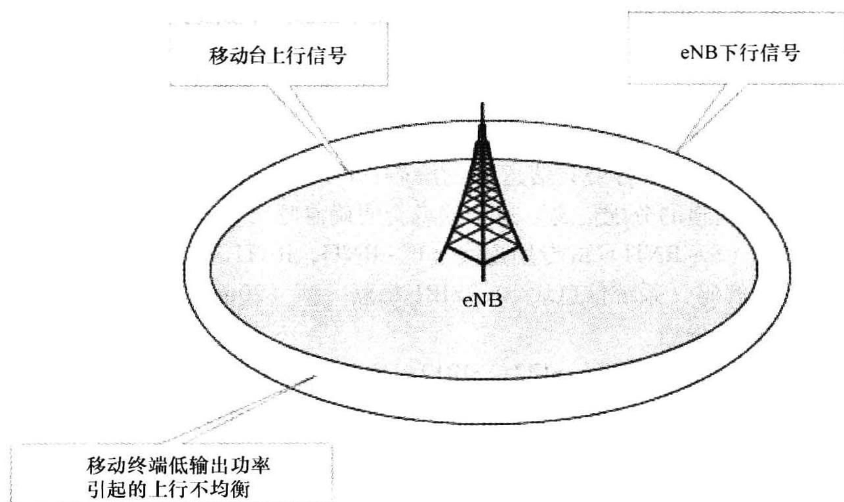


图 7.10　上下行覆盖不均衡

7.4.3 移动性优化

最小化路测还可以为网络移动性优化提供必要的信息。通过收集移动性事件的无线测量，可以了解网络性能降低的位置（如切换失败率高的小区位置）。除了源小区、目标小区和其他邻小区的测量结果外，位置信息的提供对准确定位服务中断，关联特定网络拓扑也尤为重要。实际上，运营商可以得到用户移动行为的基本范围，进而实现终端的无缝切换，并对网络中的移动性问题进行优化处理。通常情况下，移动性优化的前提是，无线网络覆盖已得到充分验证，移动性问题不是由无线覆盖不佳造成的。

7.4.4 容量优化

容量优化的主要目的是改善网络容量规划、检验和优化策略。适当的网络容量监控能够为新小区和容量优化相关参数的确定提供帮助，为此，可以将网络的平均负载看作一个整体，但运营商也需要了解潜在流量与用户的位置关系。因此，统计值应允许检测定位流量分布不均或低用户吞吐量的区域。

7.4.5 公共信道参数化

配置公共信道参数很可能对系统性能产生影响。除了覆盖问题以外，非最佳参数的设置，也可能会对连接失败率产生影响。因此应对上行和下行公共信道的配置做出定义，以便检测这些信道符合已规划的小区覆盖。但不同于基本覆盖检验的是，网络可能并不知道终端访问网络时遇到的潜在问题，并且检验的目标是优化公共信道参数，而不是典型覆盖优化中调整天线模式、发射功率等。

接收机在不同阶段都可能无法访问网络：

1）同步信道的接收机：这极有可能表明在某些地区网络覆盖不足。

2）PBCH（物理广播信道）的解码：包含 MIB（主信息块）。MIB 是在每帧中的第一个子帧传输的。MIB 的周期是 40ms，即在传输过程中允许反复四次与接收到的信号相结合，以提高译码性能。

3）PDCCH（物理下行公共信道）的解码：PDCCH 携带着 PDSCH（物理下行共享信道）上不同信道的分配信息。这个信息会明确寻呼（P－RNTI，寻呼无线临时认证）、系统信息（S－RNTI）或专用连接（C－RNTI，RNTI 连接）分配的资源。

4）SIB1 的解码（系统信息块 1）：SIB1 每隔一帧（20ms 间隔）在一个固定的位置上（第五子帧）发送。

5）其他 SIB 信息的解码：SIB2～SIB12。这些 SIB 在 PDSCH 上进行动态调度。

空闲状态的 UE 也会监视寻呼信道，从而能够对来电做出反应。寻呼接收故障可能由于以下原因造成：

1）在寻呼中 PDCCH 解码故障。

2）分配的无线资源寻呼信息解码失败。

这个问题类似于广播信道的异常检测，网络知道何时该得到终端的响应。然而，

问题的评估不能仅仅基于小区，因为寻呼范围包括整个位置区、路由区或跟踪区，因此还可能需要小区间的协调。

7.4.6　QoS 检验

用户感知的服务质量（QoS）由数据传输速率、延迟、服务响应时间、丢失、中断等方面构成。网络运营商希望验证网络的不同区域提供给用户的服务水平。每个用户的 QoS 体验不仅受到小区的覆盖范围和干扰条件的影响，也受到运营商无线资源管理方法和原则的影响。运营商采取的调度原则以及数据包类型，会影响用户在网络的不同区域获得的服务质量。

当前，网络可以提供大量的信息，来表明用户的 QoS 体验结果。例如，在网络中可以跟踪用户的数据吞吐量，还可以跟踪瞬时的无线资源调度。然而，要验证网络的服务质量，预计在 3GPP R10 版本后，MDT 解决方案会有更详尽的标准，明确从网络节点和/或从终端收集的核心有用信息。

调度方法的公平性，也会影响特定无线状况下的 UE 吞吐量。低公平性调度方法强调小区的整体吞吐量，但牺牲了小区边缘用户（无线状况不佳）的 QoS。当公平性增加，网络所提供的服务质量将变得更加平均。因此，似乎应考虑较多的因素，来评估网络的优化。

对 MDT，用户吞吐量可以映射到基于位置的服务水平。因此，网络运营商可以通过无线网络的不同区域所提供的服务水平，来识别潜在的网络问题。

7.5　整体架构

基于 7.3 节总结的要求，MDT 的并行解决方案如下：

1）基于区域的 MDT（见图 7.11），其中 UE 的测量数据在一定区域内收集，这些区域由一组 UTRAN/E - UTRAN 确定的小区或一组位置区/路由区/跟踪区确定。

2）基于用户的 MDT（见图 7.12），UE 的测量数据是一个特定用户或设备的。

小区跟踪功能用于管理基于区域的 MDT。MDT 的功能在管理系统激活。管理系统在激活 MDT 的小区中与 eNB/RNC 直接通信。无线节点都使用 Uu 接口上的 RRC 协议，并与 UE 进一步通信来启动 UE 的测量。

用户和设备跟踪功能用于管理基于用户的 MDT。在这种情况下，管理系统激活 MDT，但由于目标是 IMSI 确定的一个特定用户，或 IMEI（SV）确定的一个特定用户设备，激活过程首先要接入家庭用户服务器（HSS）数据库。之后，通过核心网实体（MME/SGSN），HSS 发送会话参数给无线网络。对基于用户的 MDT 使用用户和设备跟踪功能的主要好处是，考虑了用户的移动性，也就是不管指定的用户或用户设备位于何处，都能够进行 MDT 数据的收集。

当 UE 在 RRC 连接模式或 RRC 空闲模式［分别对应 Immediate MDT 和 Logged MDT（详见 7.7 节）］时，对于基于区域的 MDT 和基于用户的 MDT，数据收集都可以完成。

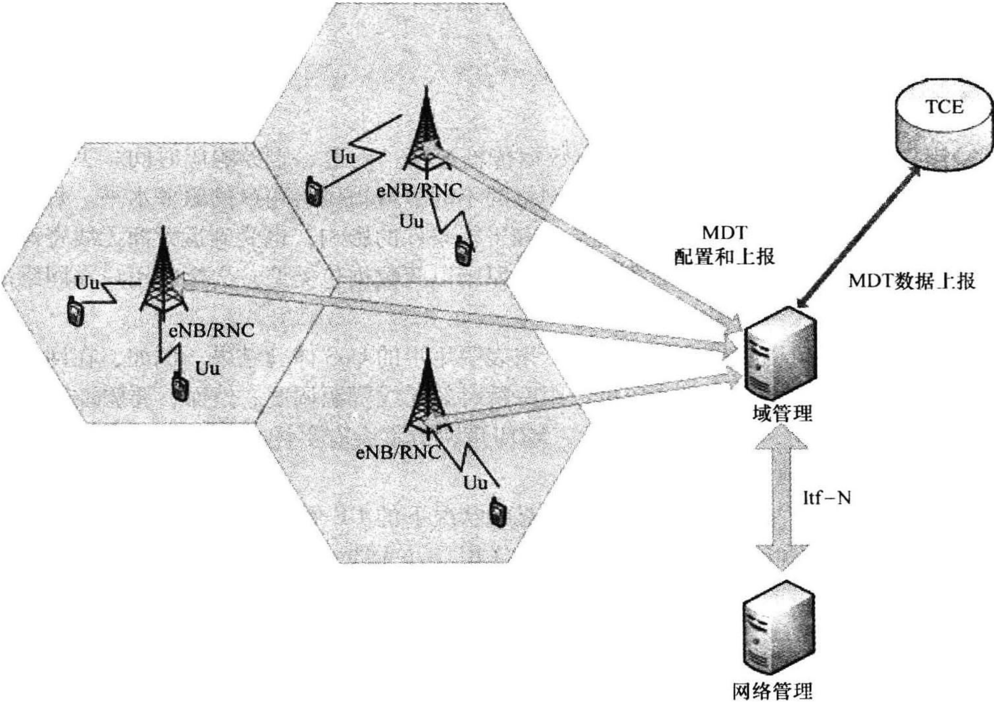


图 7.11　基于区域的 MDT 架构

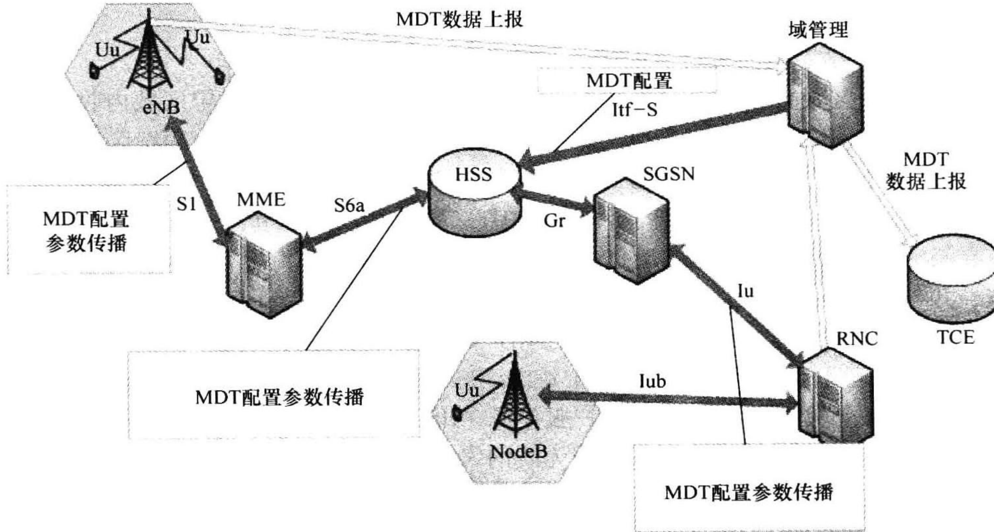


图 7.12　基于用户的 MDT 架构

7.6 MDT 操控

7.6.1 用户与设备跟踪

用户与设备跟踪功能主要用来配置和上报 MDT，因此为便于更好地理解后续章节，有必要对此项功能进行简要介绍。

用户与设备跟踪主要用于无线网络中的故障排查。有了这项功能就可以跟踪指定用户（IMSI）或设备（IMEISV）的所有作为。根据该功能的不同配置情况，可以收集不同层次的信息。

用户与设备跟踪功能的应用有两种方式：

1）基于信令的激活方式；

2）基于管理的激活方式。

在基于信令的激活方式下，一般从核心网侧开始配置，核心网会在激活过程（例如呼叫建立期间）启动无线网的跟踪会话。基于信令的激活方式也能确保对移动用户进行跟踪，也就是说，无论何时用户开始向新的区域/小区移动，网络都能进行跟踪。

在基于管理的激活方式下，配置始终由一个特定网元来完成，通常是 RNC 或者 eNB。这种情况下，如果用户正向这个 RNC/eNB 的外部移动，那么跟踪过程将不再继续，跟踪过程仅限在指定区域内生效。

所谓的小区跟踪功能是基于管理跟踪的一个特殊子集。这种场景将激活一个特定小区或一组小区的跟踪，并且区域内的所有用户都能够跟踪到。

跟踪功能的更多细节见 3GPP TS32.422（2011）。

7.6.2 MDT 配置参数

为了最大程度地实现 MDT 的灵活性，引入了一些可能的配置定义。本节描述了 MDT 所使用的配置参数。

7.6.2.1 测量列表

测量列表参数定义了 Immediate MDT 会话中 UE 应收集的测量。在 UMTS 中，可以配置以下测量：

1）FDD 模式 M1：UE 测量 CPICH RSCP 和 CPICH Ec/No。

2）1.28Mchip/s TDD 模式 M1：UE 测量 P - CCPCH RSCP 和时间槽 ISCP。

3）M2：NodeB 测量 SIR/SIRerror。

在 LTE 网络，可以收集以下测量：

1）M1：UE 测量 RSRP 和 RSRQ。

2）M2：UE 测量功率余量。

7.6.2.2 上报触发

上报触发参数定义了 Immediate MDT 会话测量上报的触发。两个触发器已在 R10

的 Immediate MDT 中标准化，即定期和基于事件的触发（当服务小区低于门限值时，即 LTE 中的 A2 事件，UMTSFDD 中的 IF 和 UMTS FDD 中的 1L）。

7.6.2.3 上报间隔

上报间隔参数定义了一次 Immediate MDT 会话中的周期测量间隔。在 UMTS 中，可以使用以下数值的上报间隔（单位为 ms）：250、500、1000、2000、3000、4000、6000、8000、12000、16000、20000、24000、28000、32000、64000。

在 LTE 中，可以使用以下数值的上报间隔（单位为 ms）：250、500、1000、2000、3000、4000、6000、8000、12000、16000、20000、24000、28000、32000、64000。

7.6.2.4 上报数量

上报数量参数定义了一次 Immediate MDT 会话中应周期上报的测量报告的数量。LTE 和 UMTS 的上报数量可以是 1、2、4、8、16、32、64 和无限多。

7.6.2.5 事件门限

事件门限参数定义了 Immediate MDT 会话中基于事件上报的阈值（服务小区低于阈值）。阈值可以是 RSRP 范围 0 ~ 97、RSRQ 范围 0 ~ 34。

7.6.2.6 记录间隔

记录间隔参数定义了 logged MDT 中记录测量结果的周期。以下记录间隔对 LTE 和 UMTS 均适用：1.28、2.56、5.12、10.24、20.48、30.72、40.96、61.44。

7.6.2.7 记录时长

记录时长参数定义了 UE 保留 MDT 配置的有效时长。当 UE 接收到 MDT 配置时，计时器开启。UE 状态转换过程或 RAT/PLMN 变更时，计时器均保持计时。以下记录时长对 UMTS 和 LTE 均适用（单位为 s）：600、1200、2400、3600、5400、7200。

7.6.2.8 区域范围

区域范围参数指定了 MDT 数据采集小区或跟踪区/路由区/位置区的具体地理区域。在 UMTS 网络中，区域范围可以是一系列小区或位置区/路由区。在 LTE 网络中，区域范围可以是一组小区或者跟踪区。区域范围最大可以配置为 32 个小区或 8 个跟踪区/位置区/路由区。如果该参数没有配置，则 UE 在收到记录测量配置的整个 RPLMN 范围内收集数据。该参数对基于管理的跟踪和基于信令的跟踪均能适用。基于信令的跟踪方式下，当且仅当 UE 漫游到指定区域时，MDT 才收集指定 IMSI 或 IMEI 的信息。

7.6.2.9 跟踪参考点

跟踪参考点参数由移动国家代码（Mobile Country Code，MCC）、移动网络代码（Mobile Network Code，MNC）和跟踪 ID 共同组成，移动国家代码和移动网络代码标识一个 PLMN，其中包含配置 MDT 的网管。跟踪 ID 是一个 3B 的八进制串。跟踪参考点参数为全局惟一，用来惟一标识一次 MDT/跟踪会话。

7.6.2.10 跟踪记录会话参考

跟踪记录会话参考参数指定了一次跟踪会话内的跟踪记录，为 2B 的八进制串。该参数可以与跟踪参考点一起对跟踪收集实体（Trace Collection Entity，TCE）中 UE

收集到的数据进行关联。

该参数指定了跟踪收集实体的 IP 地址，跟踪记录会转发至此 IP 地址，地址可以是 IPv4 或 IPv6 的形式。

7.6.2.11　TCE ID

TCE ID 是发送至 UE 而非 IP 地址的 TCE 标识参数。eNB/RNC 中存有一张映射表，可以提供 TCE ID 和 TCE IP 之间的映射关系。

7.6.3　基于用户的 MDT

基于用户的 MDT 的目标是收集一个指定用户或用户设备的 MDT 数据。基于信令的跟踪功能用于管理基于用户的 MDT，因此用户和设备跟踪使用的参数是 MDT 参数的扩展。MDT 的激活过程由管理系统开启，管理系统向 HSS 指示跟踪会话的激活，HSS 存储着指定用户/设备的用户数据。由于 MDT 的目标为指定用户，因此为确保用户隐私，需要进行用户许可检查。如果事先未得到用户许可，则 MDT 无法启动，因此 HSS 会拒绝 MDT 激活。反之，如果 MDT 正常激活，则参数将存入 HSS。如果用户尚未注册网络，则跟踪会话不会进一步发送，也就是说，跟踪会话会保存在 HSS 中。一旦用户通过附着过程注册网络，跟踪会话就将在网络中进一步发送。

E - UTRAN 中的详细过程如图 7.13 所示［引自 3GPP TS32.422（2011）］。

HSS 通过 S6a 更新位置应答消息将 MDT 参数以及跟踪控制和配置参数同时发送给 MME 激活跟踪会话，MME 收到跟踪控制和配置参数以及 MDT 参数，并进行存储。

如果 UE 完成网络注册，则跟踪会话就会通过插入用户数据过程完成激活。

当 UE 再次连接时，如初始化会话建立时，MME 首先检查跟踪会话的区域范围是否已经给出。如果区域范围已经给出，就意味着仅当指定用户或设备漫游到指定区域时才执行 MDT。

如果用户或设备漫游到指定区域内，则 MME 通过 SI - INITIAL CONTEXT SETUP REQUEST 消息向 eNB 同时发送跟踪控制配置参数和 MDT 参数。

如果 UE 已经存在激活链接，则 MME 能够通过 SI - TRACE START 消息转发 MDT 激活状态。

此时，eNB 根据接收到的 MDT 参数来配置 UE 采集数据。这种 UE 的配置方法取决于 MDT 的类型（Immediate 或 Logged）。若为 Immediate MDT，配置过程通过使用现有 RRC 过程和消息来实现，若为 Logged MDT，则配置过程通过使用新的 RRC 消息 LoggedMeasurementConfiguration 来实现（详见 7.7 节）。

应当指出，对于基于信令的 Logged MDT，是不需要发送跟踪参考点、跟踪记录会话参考和 TCE ID 参数给 UE 的。基于信令的 MDT，由 MME 向 eNB 激活跟踪会话。因此，当 UE 发送其收集到的记录时（如 7.6.5 节所述），eNB 会从 MME 收取 MDT 的参数，包括跟踪参考点和跟踪收集实体的 IP 地址。

在基于信令的 MDT 方式下，Logged MDT 通过空中接口发送配置给 UE，为了避免不必要的配置，当 eNB 从 MME 收到跟踪会话激活时，eNB 必须检查是否已收到过记录可用性的指示。

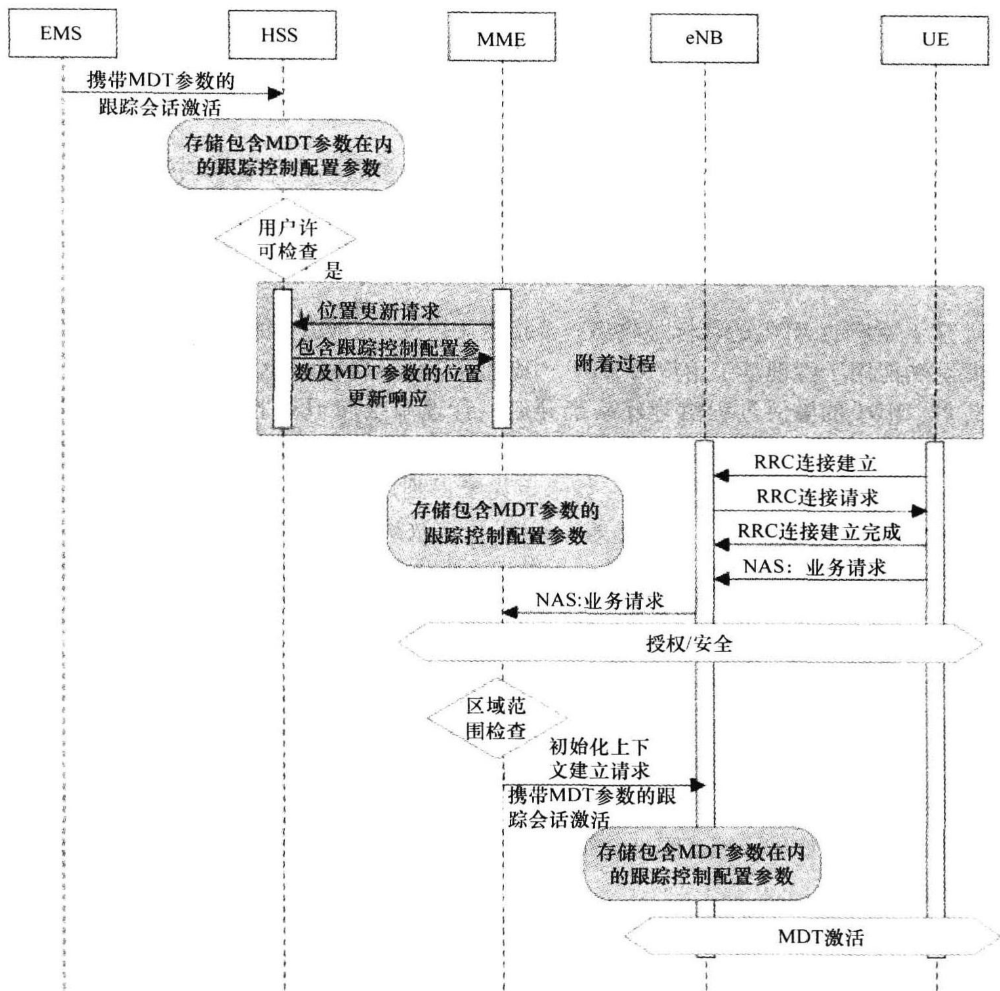


图 7.13 E－UTRAN 中 MDT 激活过程（3GPP TS32.422，2011，通过 3GPP 修改许可）

UTRAN 中的激活过程与 E－UTRAN 的用例非常相似，如图 7.14 所示（引自 3GPP TS32.422，2011）。

如果 UE 未注册网络，则 MDT 激活会作为附着过程的一部分来发送，这与 E－UTRAN 的用例很相似。MDT 参数通过 MAP－INSERT SUBSCRIBER DATA 消息发送给 SGSN，该消息包含了 MAP ACTIVATE TRACE MODE 过程。

如果 UE 已注册到网络，则 MDT 参数可以在一个单独的 MAP－INSERT SUBSCRIBER DATA 消息中发送到 SGSN。一旦 SGSN 收到 MDT 参数，它就会将 MDT 参数存储在数据库中，这与 MME 类似。如果基于用户的 MDT 的区域范围已经给出，则 SGSN 负责检查用户是否漫游到指定区域。MDT 激活命令会通过 Iu 接口的 RANAP CN INVOKE TRACE 消息发送至 RNC。

当 RNC 收到 MDT 参数时，它负责激活 UE 的 MDT 功能。UE 采取的方法取决于

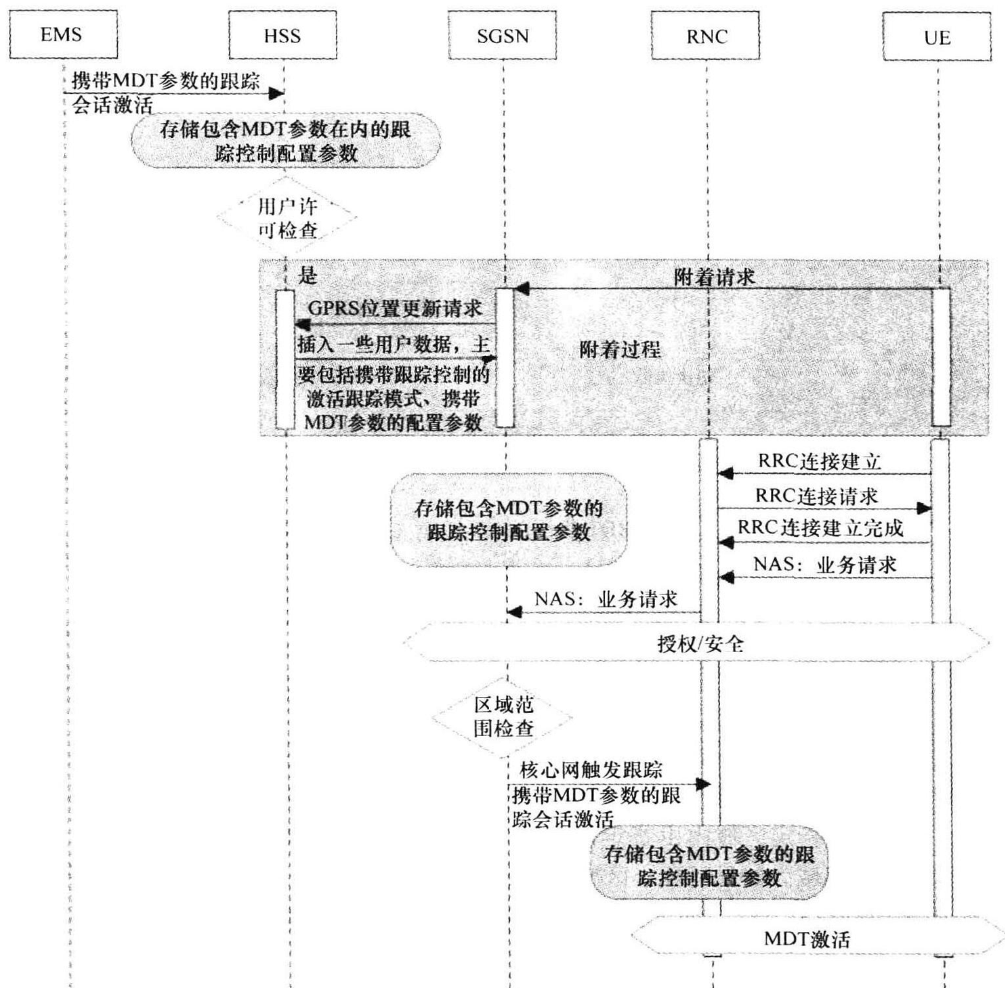


图7.14 UTRAN中PS域MDT激活过程（3GPP TS32.422，2011，通过3GPP修改许可）

MDT模式（即时或非即时，详见7.7节）。

应该注意的是，上述UTRAN过程仅以一次PS连接为例，MDT也可以通过CS域进行激活。如果通过MSC服务器来激活MDT，那么从MDT角度讲，MSC服务器负责的功能与上述SGSN负责的功能相同。

7.6.3.1 移动性管理

在基于用户的Immediate MDT中，基于信令的跟踪流程，也会对用户的移动性进行跟踪。这意味着，每当用户移动到一个新的位置，比如一个新的小区，网络负责在切换过程中保持MDT上下文，并转发MDT参数至目标节点。基于X2的切换场景如图7.15所示。

切换过程从切换准备开始。在切换准备过程中，源eNB发送X2切换请求消息给目标eNB。如果目标eNB与源eNB属于同一个PLMN，则源eNB负责转发跟踪和

MDT 参数到目标 eNB。因此，跟踪会话和 MDT 可以在目标端继续进行。

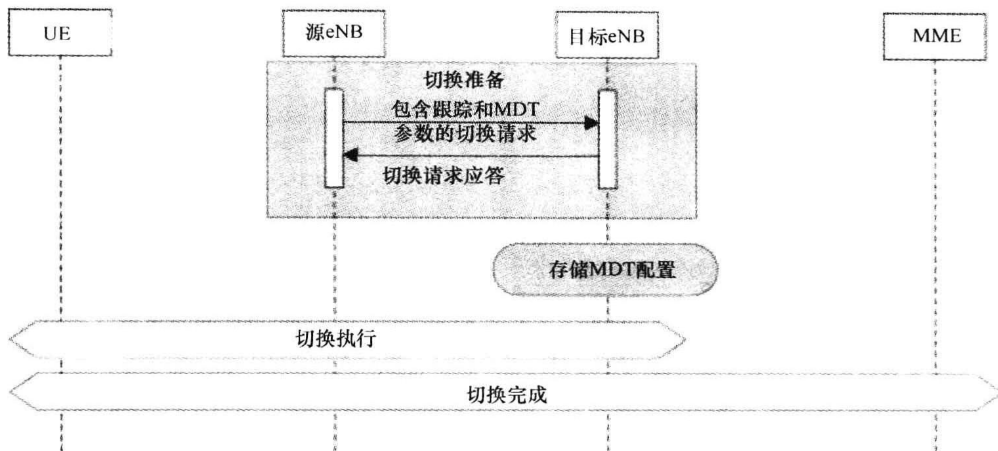


图 7.15 伴随 MDT 激活的 X2 切换（3GPP TS23.401，2011，3GPP 许可修改）

如果目标 eNB 与源 eNB 属于不同 PLMN，则切换过程就是一个跨 PLMN 的切换，此时源 eNB 不得转发 MDT 上下文，以避免外部 PLMN 收集 MDT 数据。尽管 UE 的去激活是在 RAN 侧实现，也不应该再继续 MDT 功能了。

如果源 eNB 和目标 eNB 之间没有部署 X2 接口，则切换过程通过 S1 接口进行。

如果通过 S1 接口进行切换，则切换流程由 MME 控制。若 MDT 已经定义了区域范围，也就是在指定区域内由指定的 IMSI 执行 MDT，则源 MME 需要检查目标小区是否属于指定区域。如果目标小区属于 MDT 数据采集的指定区域，则源 MME 负责转发 MDT 参数到目标 eNB。如果目标 eNB 与另一 MME 连接，则源 MME 通过目标 MME 发送 MDT 参数给目标 eNB，如图 7.16 所示。

如果是 S1 接口跨 PLMN 之间的切换，则 MME 会解除源 eNB 的 MDT 功能。在这种情况下，源小区不会向目标小区转发 MDT 上下文。另外，MDT 测量配置的删除由 RAN 侧实现。如果 UE 后来又回到原来的 PLMN，则 MME 负责重新激活 MDT 功能。

由于在源 eNB 中，UE 已经配置为 Logged MDT，并且 Logged MDT 测量主要是在 UE 处于 Idle 状态时进行，因此对于 logged MDT 来说，不需要将 MDT 的上下文发送给目标 eNB。

7.6.4 基于区域的 MDT

基于区域的 MDT 主要针对一个特定的区域。区域定义为一个或一组 UTRAN/E－UTRAN 的小区、跟踪区、位置区或路由区。对于一个 MDT 会话，最多可以支持 32 个小区或 8 个跟踪/位置/路由区。应当指出，区域范围也可以定义为基于用户的 MDT。这种场景下，MDT 只在区域范围定义的区域内为指定 IMSI 或 IMEI 号执行。一旦在一个区域内激活 MDT，若没有选择特定的用户（IMSI 或 IMEI 号），则指定区域

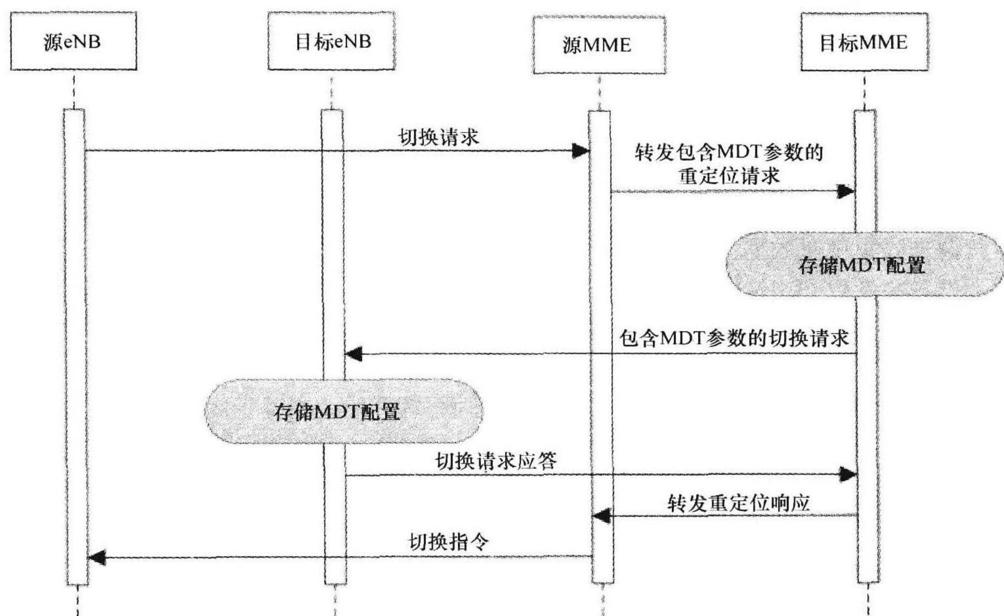


图 7.16　伴随 MDT 激活的 S1 切换（MME 变更）（3GPP TS23.401，2011，3GPP 许可修改）

内的所有具备 MDT 能力的 UE 都会配置 MDT 功能。为了确保用户的隐私，在区域内启动 MDT 之前需要得到用户许可。只有事先许可的用户才能参与 MDT 数据采集。这种无线网侧（eNB/RNC）存储和提供用户许可的机制与基于用户的 MDT 相同，如图 7.17 所示。

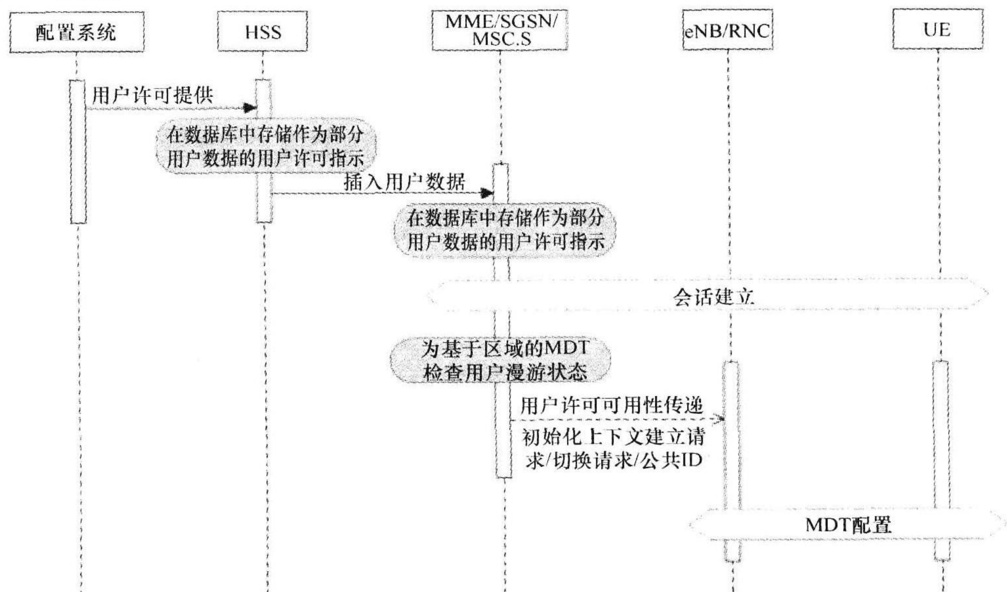


图 7.17　用户许可流程（3GPP TS32.422，2011，获得 3GPP 许可）

这种向业务提供商提供用户许可的方式尚未确定，这取决于业务提供商的部署解决方案。用户许可作为部分用户数据存储在 HSS 的数据库中，并在用户数据转发或更新时进一步传给 MME/SGSN/MSC 服务器。核心网网元（MMESGSN 或 MSC 服务器）检查用户的漫游状态。如果用户是本地漫游用户，则无需向 eNB 或 RNC 提供用户许可，从 MDT 数据采集中剔除本地漫游用户。剔除本地漫游用户的主要原因是因为不同国家有不同的隐私法规，用户只向其本土运营商提供许可。因此，只允许本土运营商来收集敏感数据。另一方面，从业务提供商的角度看，MDT 数据可能包含敏感数据，会导致 PLMN 中采集的数据传递到同一 PLMN 的 TCE 中。如果核心网实体确定用户是本地用户，并且该用户存在可用的用户许可，则会在 UE 选择过程中向 eNB/RNC 发送可用用户许可指示。

与基于用户的 MDT 相似，MDT 激活从管理系统开始。在基于区域的 MDT 中，激活过程选定目标 eNB 或 RNC 以控制指定小区。当 eNB 或 RNC 向 UE 激活 MDT 时，采用与基于用户的 MDT 相同的过程：

1）Immediate MDT 使用 RRC 连接重配消息；
2）Logged MDT 使用新的非即时测量配置消息。

7.6.5　管理系统的支持功能

正如已经描述的，用户和设备跟踪主要用于管理 MDT 功能。因此 MDT 北向接口的支持功能为 TraceIRP，它定义了北向接口的相应操作（参见 3GPP TS32.441，2011 和 TS32.421，2011）。

ActivateTraceJob 可以分别激活跟踪功能和 MDT 功能。具体操作通过 MDT 所要求的属性进行：

1）区域范围：定义为应执行 MDT 的小区的指定区域。
2）作业类型：定义所要求的作业是仅 MDT、仅跟踪还是 MDT 和跟踪的结合。
3）所有参数定义在 7.6.2 节中。

Deactivate Trace Job 可以停止 MDT。MDT 会话通过跟踪参考点识别，跟踪参考点是已有的操作参数。

ListTraceJob 可以查询已有跟踪会话参数和 MDT 会话。此操作可以提供激活 MDT 会话参数的实际数值。

7.6.6　MDT 上报

所有 MDT 操作的宗旨，是向数据库提供 MDT 报告。所有采集到的 MDT 测量会发送至一个特定的文件服务器，称为跟踪采集实体（Trace Collection Entity，TCE）。

7.6.6.1　Immediate MDT 上报

Immediate MDT 过程如图 7.18 所示。

一旦 UE 配置为 Immediate MDT，当满足上报触发条件时，UE 将向 RAN 侧发送测量报告。7.2 节详细描述了无线接口的上报流程。此外，为了完成上报操作，数据会在 eNB/RNC 中进行处理（如加时间戳、加附的网络测量），并转发给 TCE。MDT

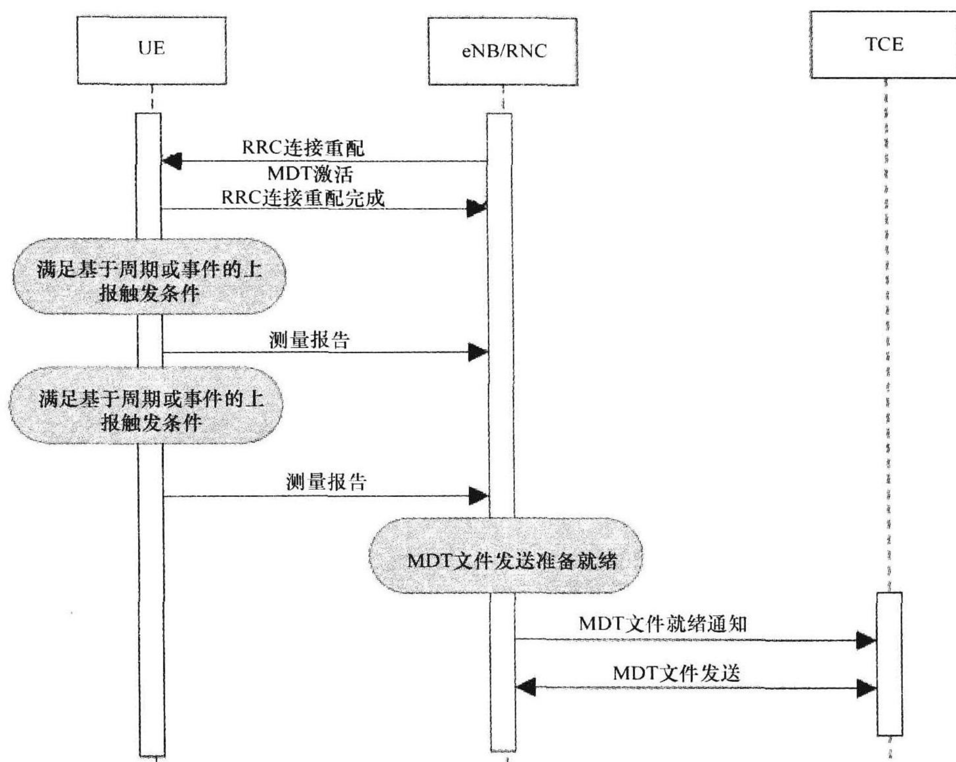


图7.18 Immediate MDT配置和上报过程（3GPP TS32.422，2011，3GPP许可修改）

数据何时从eNB/RNC发送到TCE，取决于设备商实现。每个设备商有特定的标准来发送文件。文件格式为XML文件，当文件准则满足时，eNB/RNC给TCE发送一个通知，指示文件已准备就绪。当TCE收到通知就可以使用文件传输协议下载文件了。

7.6.6.2 Logged MDT上报

Logged MDT的上报与Immediate MDT稍有不同，过程如图7.19所示。

7.2.3节对无线流程上下文机制进行了详细说明，但是上报同样由RAN侧节点最终确定。与Immediate MDT上报类似，eNB/RNC何时将MDT记录发送给TCE不属于3GPP的定义范围，这取决于设备商的实现。当文件准则满足通知条件时，eNB/RNC就会发送通知给TCE，TCE使用文件传输协议下载MDT记录。

Logged MDT上报与Immediate MDT上报的主要区别在于MDT数据发送到TCE之前，eNB/RNC不知道跟踪相关配置（RRC连接释放后MDT上下文才释放）。因此，UE存储的跟踪相关参数（跟踪参考点，跟踪记录会话，TCE ID）是由UE上报给网络并提交MDT记录。跟踪参考点和跟踪记录会话参考可以将属于相同跟踪（MDT）会话的TCE数据进行关联。通过TCEID可以获取正确的TCE IP地址。

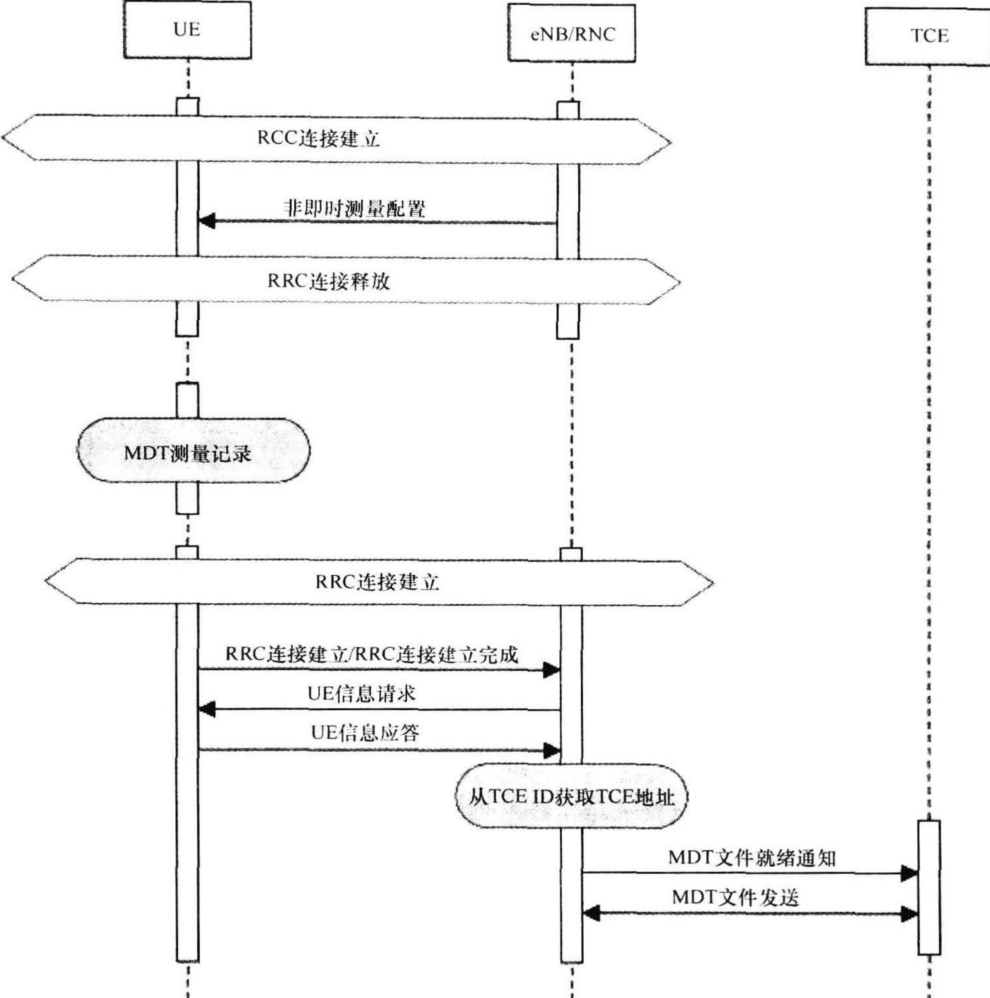


图 7.19　Logged MDT 配置和上报流程（3GPP TS32.422，2011 和 TS37.320，2011，3GPP 许可修改）

7.7　MDT 无线接口流程

MDT 测量数据的收集有两种操作模式：Immediate MDT 和 Logged MDT。前者使用常规的 RRC 测量配置和上报原则，但是 MDT 上报的测量数据中包含了获取该数据的位置和时间信息。后者是在 UE 处于 IDLE 状态时存储无线测量结果，然后在 UE 下一次连接建立时上报这些测量结果。后续章节将详细介绍这两种模式的配置、测量和上报。

7.7.1　Immediate MDT

Immediate MDT 模式对 UTRA 和 E－UTRA 均适用。然而，UTRA 协议在 R10 版本

之前就已经给出了功能要求。因此在UTRAN中，传统终端也可以用于MDT测量。本节以E－UTRA为例描述Immediate MDT的功能。相应的信令流程和消息也同样适用于UTRA，但位置信息除外，位置信息请求与测量配置是独立的。

7.7.1.1　E－UTRAN中的Immediate MDT配置

图7.20说明了E－UTRAN网络Immediate MDT的配置。Immediate MDT使用了现有RRC信令流程和消息来配置MDT，并将测量报告发送至RAN侧。在E－UTRAN中，eNB从网管系统（见7.6.2节）收到MDT配置参数，并将其转换为RRC连接重配置消息，发送给UE来启动MDT测量和上报。配置信息包括以下信息：

1）测量对象：载波频率。

2）报告配置。

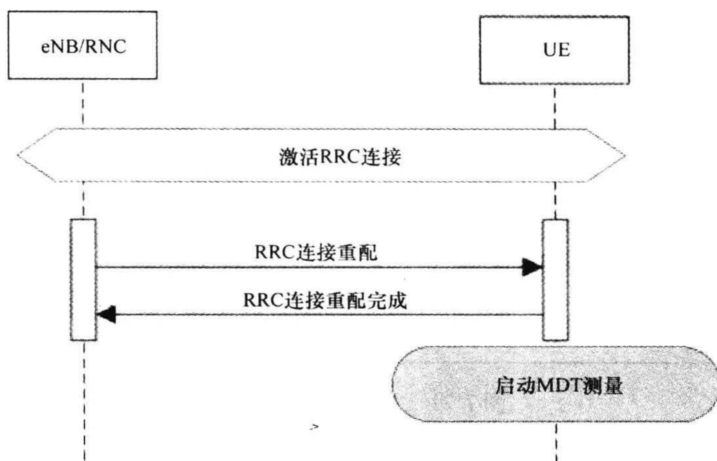


图7.20　E－UTRAN网络Immediate MDT配置（3GPP TS32.422，2011和TS37.320，2011，3GPP许可修改）

MDT报告配置定义了发送报告的条件以及报告应包含的测量参数：

1）报告触发：周期性和A2事件（服务小区变得比阈值差）。

2）触发值：RSRP或RSRQ。

3）上报值：与触发值相同或者两者都有。

4）不包括服务小区的最大上报小区数：8个小区。

5）上报间隔：120ms、240ms、…、1h。

6）上报数量（对于周期上报）：1、2、4、…、64、无穷。

7）包含可用位置信息的请求。

周期上报也能伴随着A2事件，这就是基于事件的周期上报。这种上报机制在收集问题覆盖区的测量结果时非常有用。“上报数量”用于定义上报数据的测量“窗口”。

7.7.1.2　Immediate MDT上报

一旦UE配置为Immediate MDT，当上报触发条件满足时［上报周期超时或发生

A2 事件（UMTS FDD 中的 IF 或 UMTS FDD 中的 1L）]，UE 会立即发送测量报告。图 7.21 说明了基于 A2 事件的上报。

UE 将发送测量报告消息至 RAN 侧，测量报告消息包含了配置消息定义的参数的最新测量结果，如图 7.22 所示。

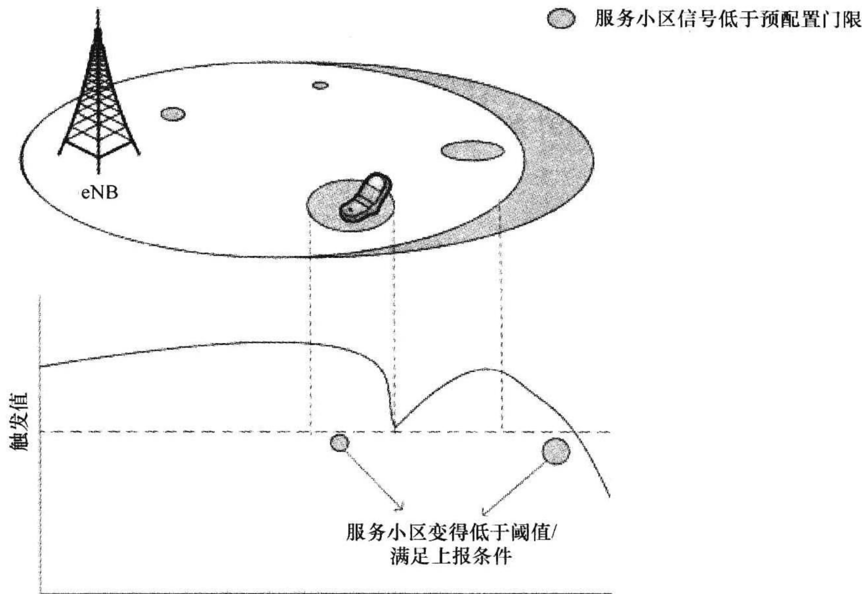


图 7.21　A2 事件触发上报

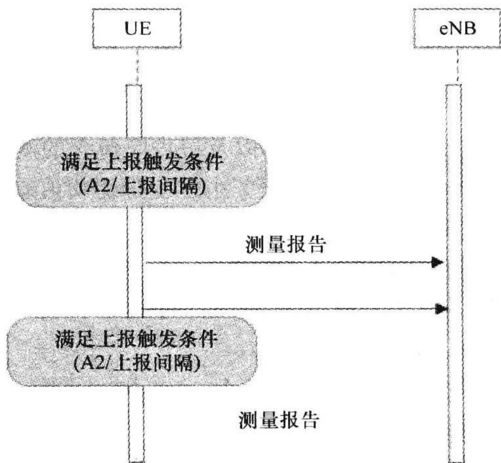


图 7.22　E－UTRAN 中的 Immediate MDT 上报流程

测量完成时，每当位置信息可获得时，UE 就会在报告中加入位置信息。位置信息可以是小区 ID、射频指纹（邻小区测量结果）或从单独的定位功能获取的精确位

置信息。精确位置信息来自全球导航卫星系统（Global Navigation Satellite System，GNSS），GNSS 可以是 GPS、伽利略、格洛纳斯（俄罗斯卫星导航系统）或类似的系统。

该报告将在 SRB2（如果是 UTRA 则为 SRB4）上发送。除了可以在 NAS 消息中使用外，SRB2 还可以扩展到 MDT 报告中使用。SRB2 的优先级低于 SRB1，SRB1 在 SRB2 建立之前承载 RRC 消息和 NAS 消息。

7.7.2 Logged MDT

Logged MDT 利用非激活态 UE 来收集测量数据。在 E－UTRA 中，可以配置终端在空闲态时记录测量数据。在 UTRAN 中，当 UE 处于 Cell_PCH 和 URA_PCH 状态时，也可以完成记录。Logged MDT 允许低频率的上报和扩展终端的使用。这种模式下的“成本”取决于存储要求（存储记录数据），而且由于新流程的引入，复杂性也有所增加。

图 7.23 说明了 E－UTRAN Logged MDT 操作的整体原则。当 UE 处于连接状态时完成测量配置。当 UE 进入空闲状态，开始记录测量。当连接再一次建立时，UE 在网络请求下将记录的数据上报。请注意，UE 可以在网络中移动（此处未说明），并在相同 PLMN 下的小区上完成上报。

7.7.2.1 Logged MDT 配置

Logged MDT 的配置将使用新的信令流程，如图 7.24 所示。连接状态下选定的 UE 将被配置为空闲模式下（或 UTRAN 下的 Cell/URA－PCH 模式）收集测量结果。当 UE 进入空闲模式时，它开始根据 Logged MDT 的配置来记录测量结果。

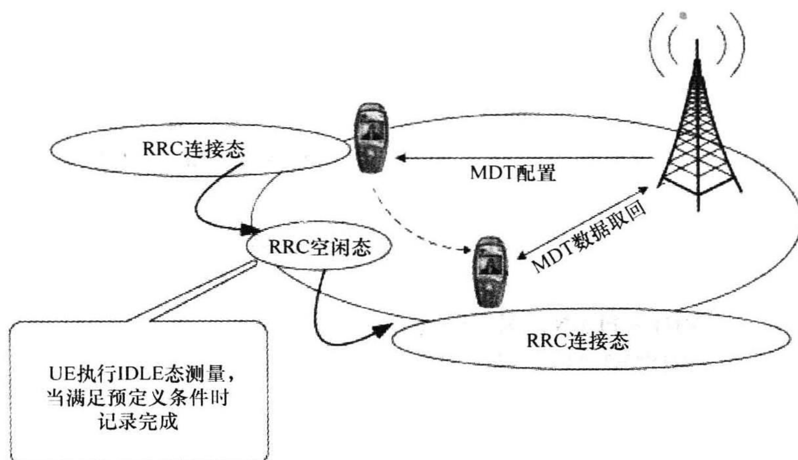


图 7.23 E－UTRAN Logged MDT 操作

RRC 配置的建立是基于网管系统（见 7.6.2 节）的 MDT 配置参数，并在 Logged-Measurement－Configuration（UTRA 中为 LOGGED MEASURMENTS CONFIGURATION）消息上发送。配置中包含以下参数来定义测量和记录准则：

1）绝对时间信息：用作相对时间戳的参考。

2）记录触发：目前只有周期性记录。

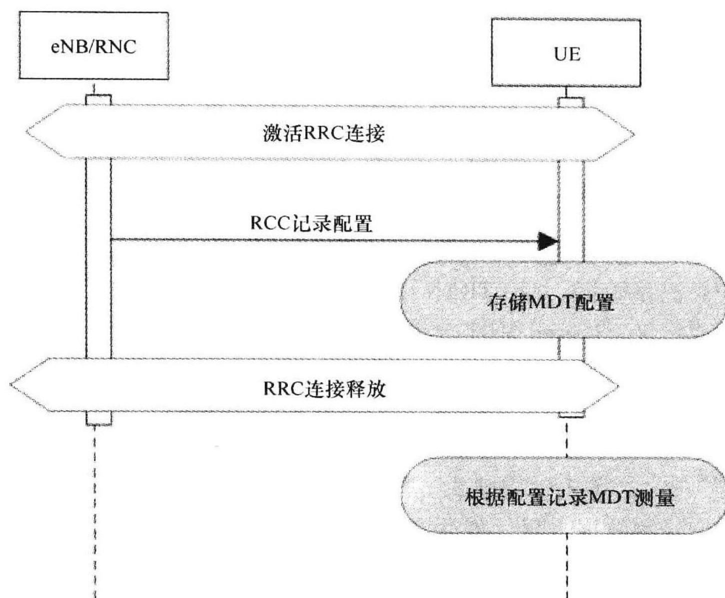


图 7.24 （E-）UTRAN Logged MDT 配置

3）记录时长：10min、20min、40min、1h、1h 30min 或 2h。计时从收到 Logged MDT 的配置开始。

4）记录间隔：1.28s、2.56s、61.44s。

5）区域配置（可选）：小区标识码（最多 32 个）列表、跟踪区（在 E-UTRAN 中为 TA）或位置/路由区（在 UTRAN 中为 LA/RA）标识（最多为 8 个）。

Logged MDT 的配置意味着记录下来的测量结果将会带有可用位置信息的标记，但无独立的配置。

当收到 Logged MDT 配置时，UE 应参考已注册的 PLMN（RPLMN）来确定是否允许记录上报以及记录的上报时间。此 RPLMN 作为 MDT-PLMN 存储。如果当前 RPLMN 值不等于 MDT-PLMN，则不得收集和上报（如果要求）MDT 记录。

此外，Logged MDT 配置还包括下列参数，以确保收集到的 MDT 数据发送至正确的文件服务器：

1）跟踪参考点。

2）跟踪会议记录参考。

3）TCE ID。

基于这些参数，RAN 节点应能确定 MDT 报告应转交的正确 TCE 地址。

跟踪参考点和跟踪记录会话参考主要用来关联属于相同跟踪（MDT）会话的 TCE 数据。TCE ID 用来获得正确的 TCE IP 地址。获取 IP 地址有两种方法：使用 DNS

解析或OAM配置给eNB/RNC的地址表。TCE ID是1B长的整数，为避免安全问题，通常使用TCE ID代替网络节点的IP地址发送给UE。7.6节详细讨论了跟踪相关的参数。

7.7.2.2 Logged MDT的有效性

Logged MDT配置性能的基本条件是UE的状态。当UE处于空闲状态（UTRA和E-UTRA）或处于CELL_PCH或URA-PCH（UTRAN）状态时才能记录测量。

此外，当测量启动时，UE应继续保持MDT记录，直到：

1）记录时间的计时器超时；

2）MDT记录存储已满（存储大小应至少为64KB）；

3）UE返回到RRC连接状态（UTRA中的CELL_DCH或Cell-FACH状态）；

4）UE移动到其他系统[无线接入技术（Radio Access Technology，RAT）]或漫游到另一个网络（PLMN）。

在后两种场景中，假如前两个条件没有满足并且当前PLMN就是最初配置的PLMN，则当UE返回到空闲状态（UTRA中Cell/URA_PCH状态）或返回到配置MDT记录的系统时，MDT记录将继续保持。记录配置应该在多个状态转换过程中存续。

UE侧一次只存储一个Logged MDT的配置（即一个MDT上下文），因此如果UE收到一个新的Logged MDT配置时，之前收集到的记录会连同MDT配置一起被清除，清除后存储新的MDT配置。

7.7.2.3 Logged MDT数据

UE一旦满足记录触发条件（即周期定时器超时），就会存储MDT记录，记录包括带有时间戳的可用小区测量结果和可用的精确定位信息。

1. 无线测量

E-UTRAN中，每个MDT记录都包含服务小区（E-UTRA中为RSRP/RSRQ，UTRA中为CPICH RSCP和Ec/No）的测量结果。此外，小区测量结果可能包括可用的邻小区信息（见7.7.4.1节）。如果精确位置信息不可用，邻小区结果也可以通过射频指纹方法来进行定位，但这并不能复制UE的定位情况。

2. 时间戳

为了能够将上报的测量结果与其他信息相关联，记录的结果会携带时间信息。网络在配置信息中发送一个绝对时间值，这个绝对时间值存储在UE中，也会包含于后续的报告中。当UE收到配置时会启动一个定时器，每次记录测量样本时，在记录的条目中附加定时器的值。有了绝对时间信息和每个记录条目的相对时间，就可以计算出每个记录条目的绝对时间。

3. 位置信息

在记录测量结果的时候，UE检查定位功能（GNSS）是否有新的可用精确位置信息，如果没有，就根据邻小区结果（RF指纹）或小区ID估算UE的位置。精确位置信息的获取一般通过是尽力而为的方式，也就是说，GNSS可能需要由另外的功能或应用程序激活。

7.7.2.4　Logged MDT 上报

UE 返回到连接态，并且在同一系统中收到 MDT 的配置（比如在 LTE 中配置且 UE 连接到 LTE 网络），此时用 1bit 指示位来指示记录的可用性。这个指示可以通过以下消息发送：

1. UTRA

1）RRC 连接建立消息。

2）UTRAN 移动信息确认消息中的 SRNC 重定位指示。

3）小区/URA 更新消息。

4）测量报告：CELL _ PCH 和 CELL _ FACH 状态之间的无缝切换消息。

2. E－UTRA

1）RRC 连接建立完成消息。

2）RRC 连接重建立完成消息。

3）切换后的 RRC 连接重配置完成消息，也可能是更新后。

当 RAN 侧节点收到记录的可用性指示时，可能会在适当的时间请求 UE 使用 UEInformationRequest 消息上报记录。记录通过 UEInformationResponse 消息发送到 RAN 侧。此消息承载在 E－UTRA 的 SRB2 或 UTRA 的 SRB4 上发送。

记录持续定时器没有超时的情况下，会发送记录指示。网络可能需要 UE 的一部分测量记录，UE 继续记录 MDT 直到满足停止标准。UE 可以删除已上报的记录数据。如果 RAN 节点未要求取得记录结果，则 UE 应将未被取走的测量记录保存 48h。Logged MDT 上报流程如图 7.25 所示。

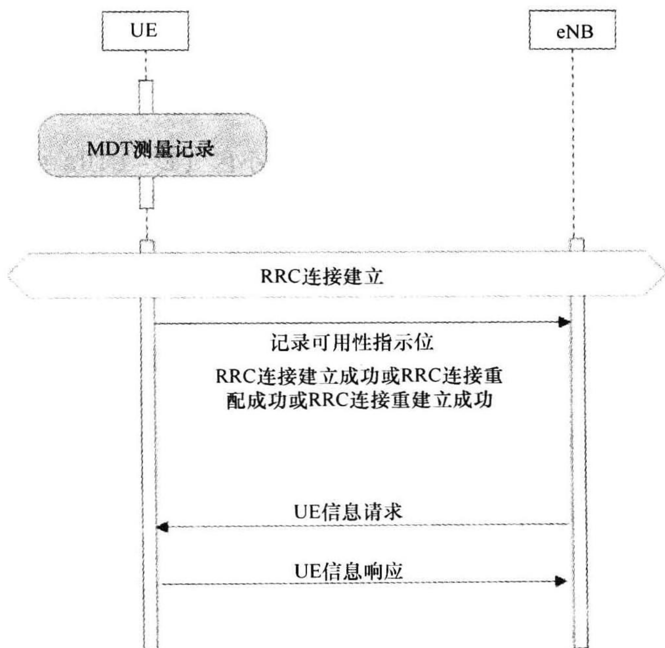


图 7.25　E－UTRAN Logged MDT 上报流程（3GPP TS32.422，2011 和 TS37.320，2011，3GPP 许可修改）

如果测量记录过大，UE应将其分段，并在多个消息中进行发送，如图7.26所示。由于SRB在RRC层没有重传的可能性，这将改善整个报告在无线接口上成功传输的概率。报告的丢失将会影响每个片段。MDT报告（和片段）不言自明，即网络可以以报告/片段为基础使用上报的数据。这意味着每个在UEInformationResponse消息上的MDT报告，除了Logged MDT数据外，还需要包含跟踪参考点，跟踪记录会话参考和TCE ID来向网络提供最终记录目标所必需的信息（见7.6.6节）。

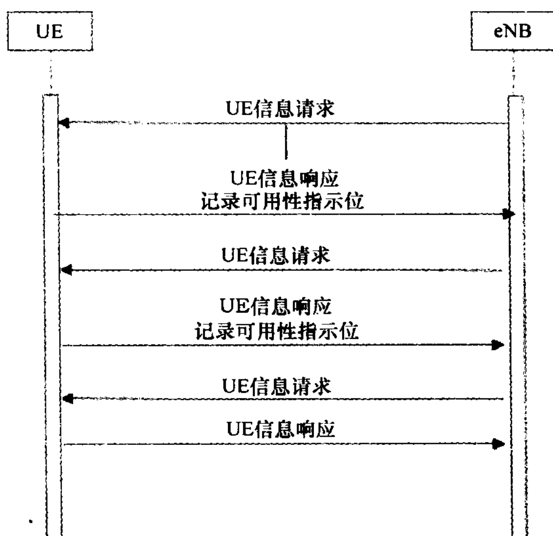


图7.26 不匹配RRC消息的Logged MDT记录上报

7.7.3 RLF上报

除了Immediate MDT和Logged MDT外，E-UTRAN的UE还可能会单独发送一个连接失败情况的报告。连接失败可能是无线链路失败（RLF），也可能是切换失败（HOF）。连接失败上报的信息将提供相关有用信息，尤其是关于网络覆盖问题区域的信息。通过限制UE仅在经历问题的情况下上报故障信息，可以看出上报机制还是比较有效的。

将测量信息与RLF报告一并发送可以用于覆盖优化（如MDT数据一样），同时它还会提供相关信息来确定与移动性行为有关的问题（支持SON移动鲁棒性优化）。

从图7.27可以看出，一旦eNB收到RLF报告，它可能会直接将RLF报告转发给MDT功能框架内的TCE，或者它可能出于SON的目的用RLF报告与邻居eNB交换信息。

RLF报告没有单独的配置，但支持此项功能的UE能收集特定的RLF数据，并在网络请求时发送给网络。关于RLF数据的可用性会有一个指示，网络通过特定的信令流程取回RLF数据。

UE应在失败时收集以下信息：

1）失败当时的小区测量结果：包括服务小区和可能的邻区结果及小区 ID（物理小区 ID）。

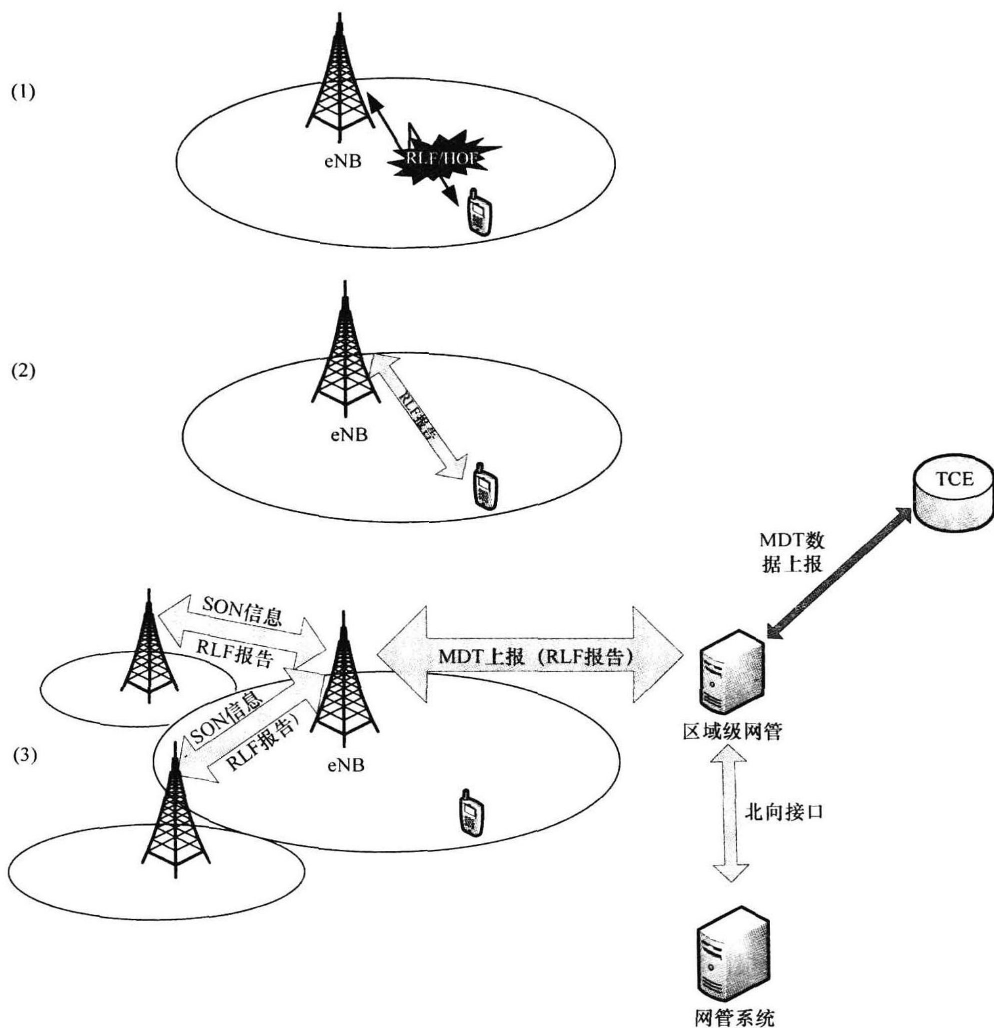


图 7.27　SON 和 MDT 中的 RLF 上报

2）失败当时可用的精确位置信息（从独立的全球导航卫星系统功能处获得）。

3）以下小区的小区标识号（ID）、全局小区 ID（E－CGI）或物理小区 ID（PCI）：

① 失败发生地的当前小区 ID、E－CGI（RLF）或 PCI（HOF）。

② 最后一次收到切换命令的小区的小区 ID（E－CGI）。

③ UE 在失败后试图建立连接的小区的小区 ID（E－CGI）。

4）最后一次成功切换的初始化到失败的时间。

5）连接失败类型指示，RLF 或 HOF。

与 Logged MDT 上报的方式一样，UE 应首先发送一个 RLF 报告存在的指示。这个指示将在连接重建成功之后（RRCConnectionReestablishmentComplete 消息）发送，或者若是重建失败或被拒绝，就在连接成功建立后发送。后一种情况下，这个指示可以通过 RRCConnectionSetup Complete 消息或者切换后的 RRCConnectionReconfiguration-Complete 消息来发送。

与 Logged MDT 报告的发送方式一样，RLF 报告是通过 UEInformationRequest/Response 信令流程来发送的。UE 也应检查请求的 PLMN 与故障发生时的 RPLMN 值是否相同。如果 PLMN ID 不同，则 UE 不应发送报告。

RLF 报告如果没有发送至网络侧，应该保存 48h，并在状态转换和系统变更时继续存在。当 RLF 信息上报至网络或 48h 定时器超时后，RLF 信息会被删除。RLF 上报流程如图 7.28 所示。

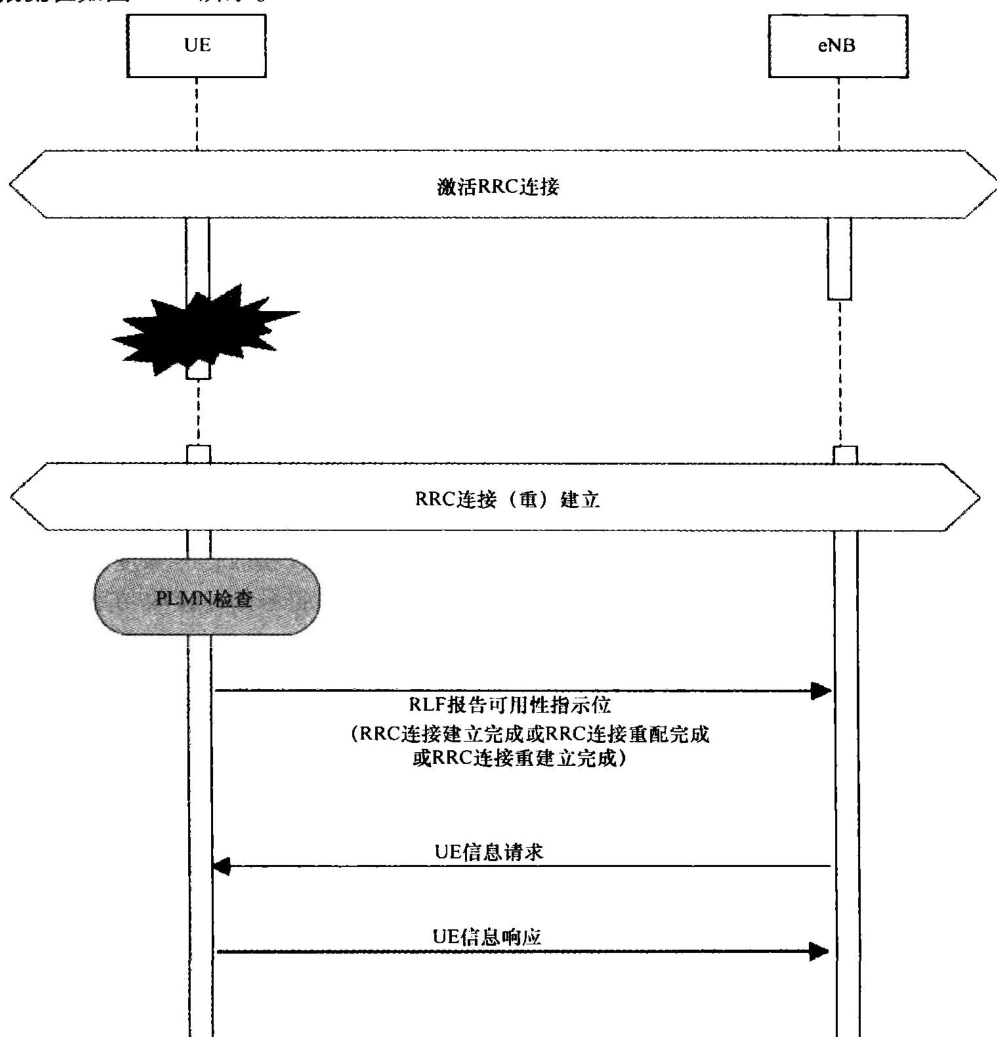


图 7.28　RLF 上报流程

7.7.4 测量参数

本节主要讨论可以由 UE 侧和 RAN 侧节点提供给 MDT 数据收集的无线测量。UE 的上报机制已经在 3GPP TS25.331（2011）和 TS36.331（2011）的 UTRA 和 E－UTRA RRC 协议中分别定义。

7.7.4.1 下行测量

1. Immediate MDT

Immediate MDT 的 UE 应测量以下参数：

（1）UTRAN

1）UE 测量的 CPICH 的 RSCP 和 CPICH 的 Ec/No。

2）P－CCPCH RSCP 与时隙 ISCP UTRA 的 1.28 TDD。

（2）CPICH RSCP（公共导频信道的接收信号码功率）

该参数代表 UE 能从其测量的小区接收到的主公共导频信道的信号水平。

（3）CPICH Ec/No（每噪声谱密度的码片能量）

该参数指示接收信号的信号质量，“No”代表包括热噪声和干扰在内的总接收功率。

（4）P－CCPCH RSCP［主公共控制物理信道（BCH 传输信道承载）的 RSCP］。

（5）时隙 ISCP（干扰信号码功率）

考虑只接收干扰功率，RRC 需要在解扩合并之后，过滤接收信号的平均功率。相当于 RSCP 的值，但只接收干扰，不接收信号。

2. E－UTRAN

1）UE 测量的 RSRP 和 RSRQ 值。

2）RSRP（参考信号接收功率）：这是下行符号分布在时间和频率域的参考信号的测量功率。

3）RSRQ（参考信号接收质量）：RSRQ 是由载波 RSSI（接收信号强度指示）除以 RSRP，其中 RSSI 是观察到的仅包含参考符号的 OFDM 符号的总接收功率（单位为 W）的线性平均值。

处于激活连接态的 UE 也能发送功率余量报告（PHR），用于上行调度和功率控制。功率余量是小区实际发射功率和上行最大允许发射功率之间的差值。PHR 不通过 MAC 层信令发送，它不会像 RRC 测量报告一样以 MDT 为目的重复发送。

分析潜在覆盖问题的根源，定位问题是上行连接还是下行连接时，PHR 非常有用。E－UTRAN 在 MAC 层发送 PHR，不会在 RRC 消息中重复发送。转发信息至 eNB 内部的相关功能，以及列入后来转发给 TCE 的报告，均取决于 eNB 的实现。

E－UTRAN 使用实际发射功率（所有分配的物理资源块，PRBS）进行功率余量的测量。由于可以显示 UE 到底保留多少实际功率，归一化每个 PRB 的功率余量似乎更有利。

因为功率余量报告不是通过 RRC 消息发送的，并且没有 MDT 延伸定义的 MAC 上报，如果 MDT 数据收集需要位置信息，可以通过激活下行 MDT 测量和上报来获

取，如定期的下行测量上报。

3. 其他 MDT 可用下行测量

CQI（信道质量指示）信息的发送以下行调度为宗旨，它能提供有用的信息，如 UE 如何“看到”下行连接质量、适宜下行传输的信令格式等。CQI 可以是宽频带的 CQI 也可以是子频带的 CQI。后一种情况下，UE 可以上报 n 个子频带中最好的 CQI 值，或者网络可以要求上报特定子频带的 CQI。

利用 PHR 和 CQI 进行 MDT 数据分析有几种方式，但方法和算法都依赖于网络实现。

4. Logged MDT

UE 记录正常小区（重）选择过程的测量结果，非即时的 MDT 测量参数没有配置。测量数值包括 EUTRA 的 RSCP 和 RSRQ、UTRA 的 RSCP 和 Ec/No、UTRA 1.28 TDD 的 IP－CCPCH RSCP 以及 GERAN 的接收信号电平（异系统间邻小区测量）。

对每个小区类型每个频率来说，要记录的邻小区数量是有固定上限的。UE 能记录的最大邻小区数测量结果见表 7.1。

表 7.1　邻小区测量结果的记录上限

类型	小区个数
同频邻小区	6
异频邻小区	3
GERAN 邻小区	3
UTRAN（非服务）邻小区	3
E－UTRAN（非服务）邻小区	3
CDMA2000（若 E－UTRA 为服务 RAT）邻小区	3

邻小区的测量报告包括：

1）记录的小区的物理小区标识；

2）载波频率；

3）EUTRA 的 RSRP 和 RSRQ；

4）UTRA 的 RSCP 和 Ec/No；

5）UTRA 1.28 TDD 的 P－CCPCH RSCP；

6）GERAN 的接收信号水平；

7）CDMA2000 的导频相位和导频强度。

7.7.4.2　上行测量

RRC 控制的 MDT 无线测量允许利用除 UE 测量报告以外的上行测量结果。当试图找出潜在的无线网络问题或优化网络性能时，为了使数据分析更加可靠，可以结合上下行测量结果来做数据收集。

上行测量对 MDT 是有作用的：

1）UTRAN：eNB 测量的上行 SIR 和 SIR 错误。

2）E－UTRAN：eNB 测量的 SINR 值和上行信号强度。

设备商可以自由实现上行测量如何具体使用，并非所有都需要标准化，但是 MDT 的数据记录可以包含设备商特定的测量。这种可能性有利于从 eNB/RNC 传递任何可用的上行测量给 MDT 服务器。

7.7.5 位置信息

MDT 报告可以采用尽力而为的方式获取 UE 的位置信息。如何确定 UE 的位置有 3 种可能的方式：

1）小区 ID。

2）射频指纹（使用邻小区测量）。

3）使用独立的 GNSS（全球导航卫星系统）定位功能。

即时上报（服务）小区总是知道可用的小区 ID，Logged MDT 将存储服务小区的 ID。每当邻小区测量结果可用时，就将包含在报告/记录中。由于 UE 可能无法检测所有时间的邻小区信号（如当靠近服务小区基站时），带射频指纹的定位方式并不能在所有地区都得到保证。

如果其他程序或功能已经将卫星定位激活，那么从 GNSS 系统处就可以获取到精确的位置（物理坐标）。当接收到的卫星信号较差时，即使激活卫星定位，GNSS 也未必能够持续提供定位信息，尤其是室内或城区等地。

MDT 测量和 GNSS 功能通常是相互独立的功能，因此测量结果和 GNSS 坐标成为可用的时机也是随机的。UE 中的 MDT 功能应将测量结果标记最新的位置信息。某一特定位置的样本应当只用在一次 MDT 报告/记录中。当 GNSS 提供的新坐标时，应首先列入下一个精确的位置信息中。

要查询位置信息的有效性，MDT 报告也应包括 GNSS 的时间信息，网络可以使用时间信息来评估测量时刻和定位时刻间的时间差。如果时间偏移较大，测量时 UE 的实际位置可能偏离太多，而不能成为 MDT 的有效定位结果。导致的错误取决于 UE 的速度，是否使用位置信息是由网络决定的。

7.8 小结

本章主要涵盖了 3GPP 中的路测方法的演进。R10 版本定义的 MDT 功能，提供了自动化的解决方案，收集来自终端用户的反馈，从而降低运营商对人工路测的依赖。使用 MDT，运营商可以从用户的角度去探索网络，以最小的工作量和成本取得实际网络性能的整体描绘。网络性能可以通过普通 UE 收集的关键无线测量进行评估，既引入了连接态下 UE 的测量，又引入了理想态下 UE 的测量。特定跟踪流程可以增强 MDT 的功能，允许 eNB/RNC 的输入补充测量，并将 MDT 报告传输到网管的集中实体处，从而对数据进行后处理来确定无线覆盖方面的问题。

在路测中识别出可能存在的无线覆盖“痛点”尤其有价值，而对现有测量流程最重要的增强是附加位置信息。这很容易生成每个物理位置上的易于理解的网络性能报告，从而将潜在的网络故障或覆盖问题本地化。在其他方面，MDT 在很大程度上利用了标准的无线电测量和流程。因此，预计 MDT 功能与 R10 终端的整合可以平滑

进展，在市场上会出现大量支持 MDT 的终端。设备支持 MDT 操作，可以使统计量有明显的增加，并且比传统的人工数据采集对网络情况有更深的认识。同时，MDT 技术将能够压低网络审查的成本从而使运营商真正受益。

然而，R10 MDT 解决方案的重点是覆盖优化，毫无疑问 MDT 的演进超出了本章所描述内容的步伐。R10 MDT 课题中，已经发现了多种改进方法。因此，R11 正在进一步发掘 MDT 的潜能。除了进一步增强 R10 MDT 的热点——覆盖优化外，对主要涉及 QoS 检验用例的一些增强也会予以考虑。很明显，3GPP 中 MDT 演进中可能的技术提升将对最终目标进一步改善，以增强终端用户的性能，提升网络的整体可操作性。

总之，MDT 描绘了一般网络优化过程中的重大改进。MDT 以一贯高水平的网络覆盖、容量和质量为目标，其收集的测量可以广泛用于不同的用例，并且 MDT 的应用可以与 SON 的应用形成良好的适应。

参考文献

3GPP TR36.805 (2009) Technical Specification Group Radio Access Network, *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Study on Minimization of Drive-Tests in Nest Generation Networks*, ver.9.0.0., Release 9, 5 January 2010. Available from http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.805/36805-900.zip [accessed 30 June 2011].

3GPP TR32.827 (2010) Technical Specification Group System Architecture, *Telecommunication Management; Integration of Device Management Information with Itf-N*, ver.10.1.0, Release 10, 22 June 2010. Available from http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/32_series/32.827/32827-a10.zip [accessed 30 June 2011].

3GPP TS25.331 (2011) Technical Specification Group Radio Access Network, *Radio Resource Control (RRC); Protocol specification*, ver.10.3.1., Release 10, 11 April 2011. Available from http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/25_series/25.331/25331-a31.zip [accessed 30 June 2011].

3GPP TS32.401 (2011) Technical Specification Group Services and System Aspects, *General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) access*, ver.10.4.0, Release 10, 21 June 2011. Available from http://www.3gpp.org/ftp/Specs/latest/Rel-10/23_series/23401-a40.zip [accessed 30 June 2011].

3GPP TS32.422 (2011) Technical Specification Group System Architecture, *Telecommunication Management; Subscriber and Equipment Trace; Trace Control and Configuration Management*, ver.10.2.0., Release 10, 30 December 2011. Available from http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/32_series/32.422/32422-a20.zip [accessed 30 June 2011].

3GPP TS32.421 (2011) Technical Specification Group System Architecture, *Telecommunication Management; Subscriber and Equipment Trace; Trace Concepts and Requirements*, ver.10.2.0., Release 10, 01 April 2011. Available from http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/32_series/32.421/32421-a20.zip [accessed 30 June 2011].

3GPP TS32.441 (2011) Technical Specification Group System Architecture, *Telecommunication management; Trace Management Integration Reference Point (IRP): Requirements*, ver.10.1.0., Release 10, 4 April 2011. Available from http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/32_series/32.441/32441-a10.zip [accessed 30 June 2011].

3GPP TS36.331 (2011) *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC); Protocol Specification*, ver.10.1.0.

3GPP TS37.320 (2011) Technical Specification Group Radio Access Network, *Universal Terrestrial Radio Access (UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Measurement Collection for Minimization of Drive Tests (MDT)*, Overall description; Stage 2, ver.10.1.0., Release 10, 5 April 2011. Available from http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/37_series/37.320/37320-a10.zip [accessed 30 June 2011].

Holma, H., Toskala A. (2010) *WCDMA for UMTS: HSPA Evolution and LTE*, 5th edn, John Wiley & Sons, Ltd., Chichester.

Lehser (2008) *Review of Project-SON achievements and agree proposals for ongoing work in Release 8/9/10*, NGMN SON Workshop, October.

第8章 核心网的SON

Anssi Juppi、Risto Kauppinen 和 Seppo Hämäläinen

8.1 背景介绍

在前面的介绍中，自组织网络主要应用在无线接入网中，其实自组织网络的基本原理也适用于核心网的自动化管理。3GPP 标准化的与核心网有关的 SON 用例和功能都和演进的分组系统（EPS）有关。与 EPS 相关的一些用例还需要同时涉及无线网和核心网，并从这两个网获得功能。比如 ANR 功能，它根据基站检测的用户（UE）发送的报告为基础来监测新邻区。然而，EPS 有必要去支持发现新邻区的 IP 地址，这样就可以在基站间建立真正的 X2 链路。另外，没有基于标准信令或接口的 SON 功能是可以识别的。

对于任何一个 SON 来说，用于核心网的例子并不局限于 LTE 网络，也可以使用在 2G/3G 网络上。

8.2 分组核心网的 SON

8.2.1 分组核心网元自配置

自配置对于增强型分组核心网的配置非常有用。在 LTE 网络中，eNB 和 MME 之间存在成千上万条连接，而且这些连接的配置经常发生变化。因此，如果进行人工配置可能会非常麻烦，这时自配置就显得非常重要。从某种意义上来说，LTE 网络和 2G/3G 网络是有区别的：2G/3G 网络中的接口数量非常少，因为基站和核心网元之间存在起调解员作用的控制器。因此在 BSC/RNC 配置中先前的部分配置已经转移到 MME 的配置。

由于相邻网元之间太多的接口，分组核心网元的配置是一个非常复杂的任务。接下来将会通过两个用例来说明如何部分实现分组核心网网元之间的自配置。

8.2.1.1 S1 自配置

3GPP 已经详细定义了 S1 接口建立的自配置功能（3GPP TS36.413，2011），对于一个新基站来说，该配置仅是其自配置过程的一部分。S1 建立自配置减少了与 eNB 和 MME 配置相关的人工操作。特别是，商业 LTE 网络中的 eNB 数量庞大，反而使 MME 的配置工作量大大减少。

自配置过程是由 eNB 初始化的。eNB 发送自己的标识符和跟踪区域（TA）码到 MME。这样，MME 就不需要人工配置不同 eNB 的标识和 TA 的大型矩阵，而是在 eNB 运行的过程中学习 eNB 和 TA 的配置。eNB 的标识符和它的 TA 配置信息在网络

规划阶段完成。

然后，MME 向 eNB 返回它的相对容量和全球惟一的 MME 标识符（GUMMEI）。通过这些步骤，eNB 可以避免在 MME 必须进行的 GUMMEI 配置。S1 建立自配置过程如图 8.1 所示。

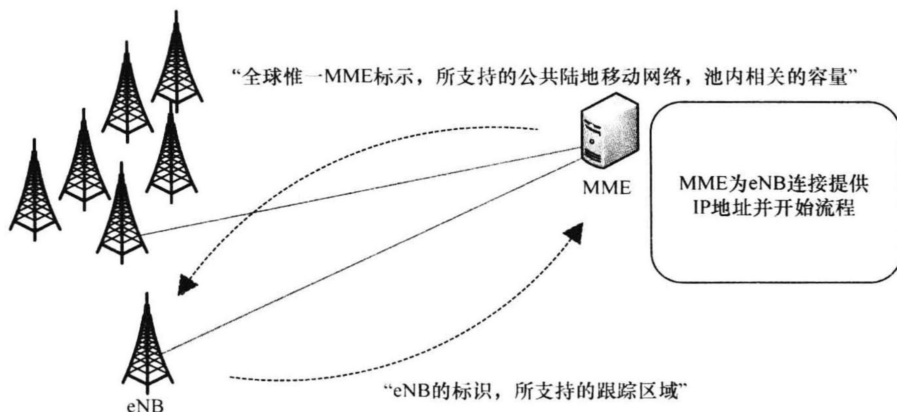


图 8.1 S1 建立自配置功能

8.2.1.2 自动软件更新与升级

网元软件的自动更新和升级可以提高核心网元的操作效率。软件的自动更新和升级功能能够从软件资料存储库中完成软件的定位和下载。软件存储库服务器通常认为是域管理系统的一部分。软件更新的触发通常是手动的，但后续的流程是自动的。一旦一个新的软件版本变为可用的，它将执行前置条件的检查以确保新的软件可以上传。一旦一个实际软件被升级到每个单元元素，后置条件检查将确保该元素可以在之前的网络环境中充分的运行。因为核心网元的复杂性，软件自动更新和升级可以减少人工操作，进而可以减少在人工配置核心网中所犯的典型的人为错误。

8.2.2 自动邻居关系

MME 为无线网络中的邻居小区和 X2 接口的自配置建立提供支持（3GPP TS23.401，2011）。因为错误的邻居关系会导致切换失败以及掉话，因此邻居小区间的关系需要仔细了解并规划。另一方面，一个典型的 LTE 网络中的邻居关系数量是非常大的，所以手动规划邻居关系非常耗时而且昂贵。

ANR 是 eNB 的一个功能，它需要 MME 来中继信息。MME 中包含了很多邻居小区中继请求，这些从源 eNB 到目标 eNB 的中继请求可以实现两个 eNB 的 X2 连接和邻区间关系自动更新。MME 是通过 S1 接口或配置传输流程来发现候选 eNB 的传输网络层（TNL）的地址。

4.2.3 节描述了自动邻区关系功能。ANR 给操作者提供了很大的方便，它自动配置每个 eNB 的 X2 连接及邻区关系表。

8.2.2.1 配置传输过程

配置传输过程是 3GPP 的一个标准功能（3GPP TS23.401，2011），它的目的是传

输属于两个 eNB 之间的应用程序的 MME 透明信息。配置传输通过 S1 接口和核心网提供一种可以在任何时间交换信息的机制。ANR 的配置传输只应用在 E - UTRAN 内部交换信息。信息通过 MME 核心网节点在两个 eNB 之间传输。为了满足信息对核心网的透明性，信息被包含在一个 E - UTRAN 的透明容器，这个容器包含源 eNB 和目标 eNB 的地址，使得核心网节点可以路由转发这些信息。

每一个携带 E - UTRAN 透明容器的配置信息被核心网节点独立路由转发和中继。任何信息间的关系对 MME 来说都是透明的。请求/应答信息在应用程序之间交换，如在 SON 应用中，两个独立的信息通过 MME 路由和中继。

当 eNB 检测出一个新邻居时，这时就需要建立 X2 连接，该 eNB 将会发起配置传输过程，首先给 MME 传输配置信息，MME 透明地中转信息给目标 eNB。这个配置信息包含了一个对 X2 的 TNL IP 地址的请求、目标 eNB 的全球小区标识符以及源 eNB 的传输地址。一旦收到来自 MME 的配置传输信息，目标 eNB 会返回它的传输层地址。收到来自目标 eNB 的 X2 的传输层地址后，源 eNB 会立即通过给目标 eNB 发送一个 X2 建立请求来初始化 X2 TNL 建立，最终两个 eNB 间的 X2 接口将会建立。配置传输过程中所涉及的信令如图 8. 2 所示。

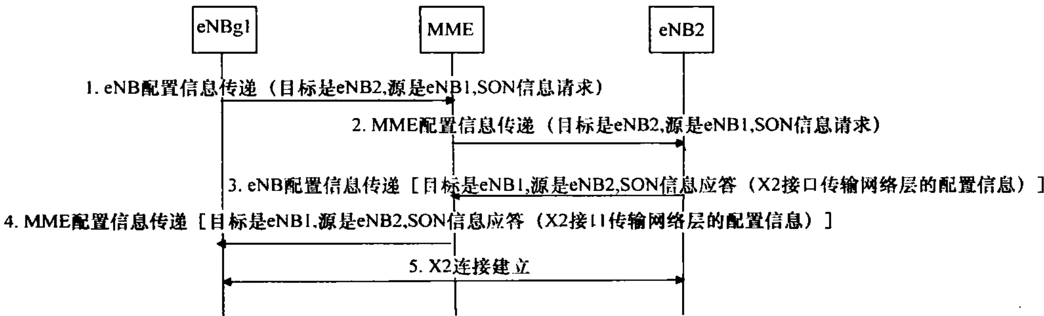


图 8. 2　配置传输流程信令

8. 2. 3　S1 - Flex（MME 池）

当 SON 的范围进一步推广，通过 MME 池实现 MME 间负载分流是分组核心网 SON 的一个用例。MME 池可以智能地从池中选择一个负载轻的 MME 来实现 eNB 和 MME 之间的通信。增强型 MME 池通过 3GPP 的信令流程可以在保证用户会话不中断的前提下，智能地实现用户分流。因此 MME 池有助于 MME 网元的自治愈和自优化。3GPP 已经在几个规范中说明 MME 池的相关功能（详见 3GPP TS36. 413，2011；3GPP TS23. 401，2011 和 3GPP TS23. 060，2011）。

S1 - Flex，也称多点 S1 或者 MME 池，使得所有的 eNB 到 EPC 节点的链接都在一个池的区域。此功能消除了严格的分层结构，因为在分层结构中，一个 eNB 只允许和一个 MME 连接。现在，一组 MME 服务由一些 eNB 组成的 MME 池区域。一个 MME 池区域可以这样定义，在这个区域中，一个 UE 可以被服务而无需改变服务

MME（3GPP TS23.401，2011）。MME 池是一个完整的跟踪区域的集合，它们可能互相重叠。池区域必须配置 E – UTRAN，在域名系统（DNS）中也需要这个信息。图 8.3 给出了一个 S1 – Flex 应用的例子。

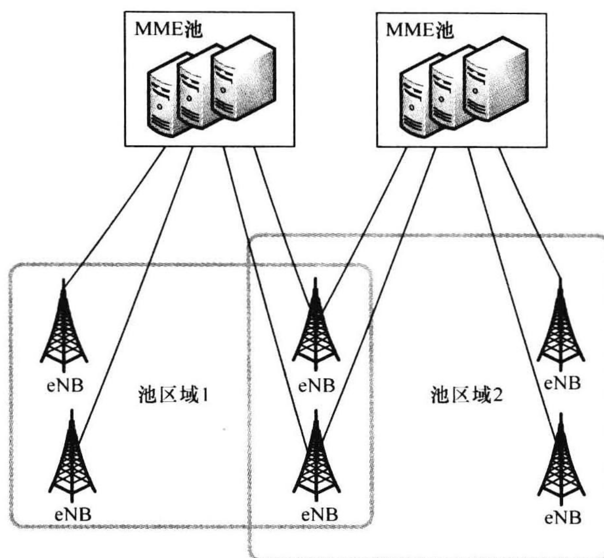


图 8.3　S1 – Flex 应用的一个例子

S1 – Flex 提供地理弹性：单个池区域内使用多个 MME 来增加服务的可用性，当主要的 MME 不能用时，池中的其他 MME 可以为该 eNB 提供服务。相对于只有一个 MME 的服务区域而言，它也可以扩大服务区域。

S1 – Flex 可以通过多个 MME 之间的负载均衡实现 MME 容量优化。根据 MME 的相对可用容量，eNB 从池区域中选择 MME。算法可以基于负载测量来修改每个 MME 的相对容量。通过 MME 配置过程可以通知 eNB 每个 MME 的相对容量的改变情况，或直接测量 MME 池中每个 MME 的负载状态，MME 中的负载均衡集中控制功能就可以将池中的一些用户转移到轻载的网元下，这样就实现了负载均衡。

另外，在 MME 节点间存在一些信令业务的负载分配。在池区域中这些自动测量和卸载功能有助于实现 MME 的负载均衡。

S1 – Flex 优化会减少网络信令负载。由于具有 S1 – Flex 功能，用户可以避免在 MME 间频繁移动，从而有助于减少 MME 和 HHS（归属用户服务器）间在 S6a 接口上的信令负载。

S1 – Flex 和 MME 分流相关，应用在 MME 间的负载均衡，这使得操作者可以在相同的 MME 池中将用户在不同的 MME 间转移而无需打断正在进行的通话。如图 8.4 所示，在刚开始时，MME 分流功能将 MME 的相对容量设置为 0，并告知 eNB 新的 UE 不应分配给正在分流的 MME。然后 MME 执行初始化 MME 的命令，在活跃用户上开始释放当前 S1 连接，产生一个原因代码 “Load balancing TAU required” 并向 UE 发

送。这触发了在 UE 上的跟踪区域更新（TAU），随之 UE 转移到一个新的 MME。非活动用户的移动这样进行：首先利用寻呼过程将用户变为活跃状态，然后应用'Load balancing TAU required'过程。MME 分流可以部分实现，并且分流的持续时间是可以配置的。此过程或者这个过程的一部分的执行可以实现池中每个 MME 达到最优负荷，从而实现负载均衡。

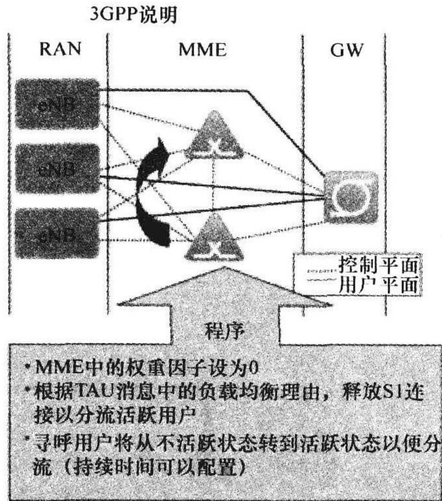


图 8.4　自动 MME 分流流程

8.2.4　信令优化

下面，两个不同的用例将会展示网络中 LTE 规范是如何提供信令优化功能的。

8.2.4.1　寻呼优化

寻呼优化的关键理念是 MME 逐步寻呼用户以减少寻呼消息的数量。在 LTE 环境中，寻呼负载可能随着 eNB 的数量而增长。减少来自 MME 寻呼信息的方法可以用逐步寻呼算法来进行优化。SON 功能可以从以下示例算法列表为某特定类型的终端选择最合适的寻呼策略：

1）首先寻呼 UE 上次连接的 eNB。

2）保持最近 UE 已经连接的 eNB 的历史记录列表，优先寻呼它们。

3）首先寻呼 UE 被定位的最近的跟踪区域（TA）。

4）保留 TA 最新的历史清单并最先保持。

5）仅当没有响应时，整个 TA 列表将被寻呼。

除了 eNB 的数量，其他事情也会影响寻呼负载，如 TA 的大小、建立注册的 TA 列表的方法以及 UE 的类型。寻呼优化可以很大程度上较少网络中的信令负载，减少了网络中的信令当然也会延长终端的电池寿命。

8.2.4.2　空闲模式下信令的跟踪区域列表

为 UE 智能调配跟踪区域列表可以明显减少 UE 空闲模式下网络的信令。UE 可以在它的 TA 列表中给定的跟踪区域移动而不会造成额外的网络信令。当离开 UE 特定的跟踪区域时，它才会发送网络信令。另一方面，为了减少寻呼信令负载，TA 列表的容量应该尽可能小。因此，TA 列表的优化可以通过优化空闲模式下的信令负载和寻呼负载来实现。减少网络中的信号也可以增加终端电池的寿命。跟踪区域的优化是通过为 UE 动态创建基于 UE 行为的 TA 列表，而不是静态配置。跟踪列表可以在 TAU 历史基础上动态创建。短或长的 TA 列表可以基于 UE 的流动模式而创建。UE 将提供一个 TA 列表，该列表与其经常访问的跟踪区域将达到最佳匹配。

8.2.5 时延优化

当一个 UE 登记到演进分组系统网络时，它必须分配相应的服务网关（S-GW）和分组数据网络网关（P-GW）。在域名系统的帮助下，网关的选择在 MME 中是自动完成的。DNS 架构是一个由 DNS 服务器组成的分层系统，其中 DNS 服务器形成有关域名和 IP 地址的分布式数据库。DNS 客户端，也叫 DNS 解析程序，执行查询数据库，以找出特定域名和 IP 地址之间的匹配。

延迟优化作为 SON 的一个用例，主要和 S-GW 的选择有关。除了 S-GW，P-GW 也需要为用户分配。现在 P-GW 的选择被认为是普通电信功能而不是 SON 的功能。P-GW 选择的基础是 P-GW 列表和 HSS 提供的访问节点名称（APN）所决定的优先级。3GPP 中有标准措施来提高 P-GW 选择的优化性（3GPP TS23.401，2011 和 3GPP TS29.303，2011）。

网关选择允许选择单独的或者地理位置在一起的服务网关：从最近的核心站点自动地选择 S-GW 和 P-GW，此外还可以从 MME 站点选择服务器，这样可以节约运输成本和优化延迟，有利于某些对延迟敏感的业务，如 VoIP。

在 S-GW 的选择中，最初的 DNS 查询是为了获取 S-GW 名称列表和优先级，这些优先级则是和给定的跟踪区域标识符（TAI）相匹配。因此 S-GW 的选择是基于用户的位置，而不是用户自身。MME 选择的目标 S-GW 是基于优先级的信息。一般选择 S-GW 最好选择离用户最近的位置，但其他位置也有可能，这取决于 DNS 的配置。此后执行第二次的 DNS 查询是为了获得 S-GW 所需的有效 IP 地址。如果 DNS 返回几个 IP 地址，MME 就使用轮询机制来平衡已选定 S-GW 接口间的负载。当为初始默认的承载选定 S-GW 后，其他默认和专用承载也将使用这个 S-GW，这意味着附着在 LTE 上的用户只有惟一一个 S-GW。

在网关的选择中，可以自动配置最好的 TAI 和 S-GW 延迟信息，这些信息将自动地映射到网络管理系统中基于拓扑信息管理的 DNS 服务器上。这种情况下，TAI 和 S-GW 拓扑上紧密结合在一起被认为是提供了最好的延迟。另外，S-GW 还可以测量到 eNB 的延迟以及相关跟踪地区的 ID，并提供映射到管理系统的列表。然后管理系统可以参考当前网络的业务能力进而利用映射列表来配置。

8.2.6 双向转发检测的快速网关收敛

为了自愈合的目的，当一个链接失败时，网元需要知道以便能够切换到一个冗余链接。双向转发检测（BFD）可用于网元功能的自动快速恢复。BFD 是一项 IETF 定义的网络协议，该协议用于检测通过链路链接的两个转发引擎之间的故障。BFD 协议可以快速、低开销地进行故障监测，这些故障包括了物理介质上不支持的任何检测故障。这类介质包括以太网、虚拟电路、通道、多协议标签交换（MPLS）、标签交换路径以及不支持开放最短路径优先的路由器。

在一个 SON 的上下文中，BFD 用于检测链路故障。当检测到故障时，网元应用程序将在网元中触发自动交换，这意味着路由的重新选择。链路故障的识别发生在一个或多个配置 LAN 路由多跳网络中（在层 2 发送和接收“hello”信息）。

BFD 功能应为单独的进程，这样就可以减少对其他网元的影响，如路由等。

8.2.7　动态 IP 地址池分配

当分组核心网使用 IPv4 地址时，遇到的最重要的问题就是 IPv4 地址的短缺。自动化 IP 地址池分配，并使之动态化将给连接服务商（CSP）带来好处。因为当需要更多的 IP 地址时，它可以控制整个 IP 地址池并完成对 S－GW 的快速地址分配。当检测到 S－GW 停机时，IP 地址池完全控制可以将不可用的 S－GW 的 IP 地址重新分配给其他 S－GW。

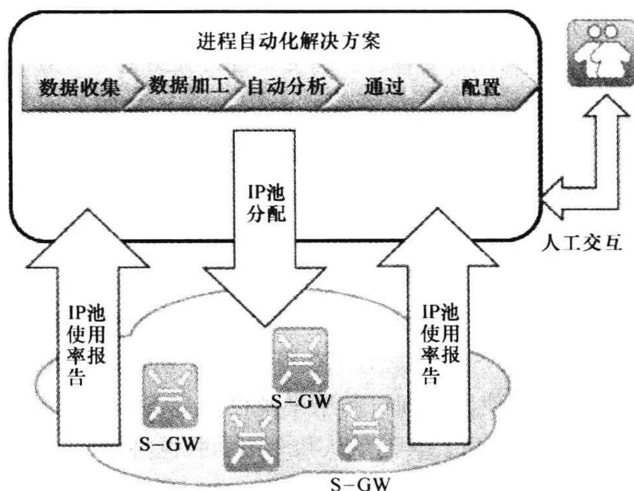


图 8.5　进程自动化中的动态 IP 池分配方案

动态 IP 地址池分配用例可以应用流程自动化解决方案，如图 8.5 所示。该流程自动解决方案负责收集报告，监督 S－GW 的可行性，给 S－GW 分配 IP 地址以及跟踪 IP 空间的使用。收集的报告包含 IP 池的利用率或在 S－GW 中基于设置阈值级别的 IP 地址利用率级别。流程自动化解决方案可以给一个网元分配更多的 IP 地址。计数器是非常“聪明”的，当 S－GW 使用较少时，IP 地址池能够重新分配。

8.2.8　节能

动态功耗引入了一种智能的方式来降低网元的功耗。主要的想法是在闲时降低网元的过程功耗，如可以通过关闭 CPU 或降低时钟频率来实现。

节能特性提高了能源的利用率，有助于环境的可持续发展。低能耗在冷却系统中也会带来一定的成本效益。

8.3　语音核心网的 SON

8.3.1　语音 IP 质量监测和管理

在 LTE 网络中，VoIP 是计划广泛使用的语音解决方案。当从传统的电路交换网转换到 VoIP 时，VoIP 的 QoS 将成为一个重要的问题。有一种机制可以确保 QoS，保证 VoIP 在 LTE 网络中成功运行，该机制就是检测端到端的语音质量，并在问题发生时来解决问题。

在 LTE 网络中，QoS 数据可以从各种不同的层次上收集：链接、元素或域级别。然而，为了创建端到端语音质量的完整画面，从终端的语音客户收集数据是非常重要的。基于这个目的，3GPP 已经定义了基于体验质量报告的标准机制（3GPP TS26.114，2010）。VoIP 客户的体验质量报告包括帧速率和抖动测量。

如图 8.6 所示，VoIP 的质量监督和管理解决方案基于进程的自动化。VoIP 的质量检测和管理的实现分为两个阶段：第一阶段是收集数据并创建一个整体的、端到端的 VoIP 语音质量视图。当这些报告和位置信息（包括源位置和目的位置）结合在一起时，就可以进行可能的分析和创建网络不同部分的 VoIP 质量的视图。位置信息可以从例如调用方的 IP 地址来得到。分析还应包括从网元或 OSS 收集的数据。基于以上分析，有可能找到语音质量差的地方并提供解决方案。

VoIP 质量的监测和管理的第二阶段是改变网络资源的使用情况。为了改善语音质量，这些操作可能会引起主动预防性操作或者路由的自动化重选。

VoIP 语音质量监测到的数据还可以集成到客户服务进程和故障本地化中，但这已经超出了 SON 的范围。

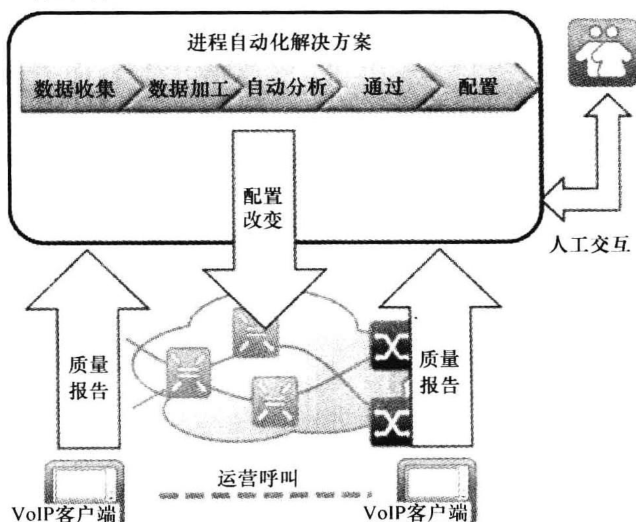


图 8.6　基于流程自动化的 VoIP 质量监测和管理方案

8.3.2 语音核心网的资源优化

LTE的语音核心网基于IP多媒体子系统（IMS）或者电路交换回落（CSFB）。CSFB可以通过已经存在的2G或3G网络来连接语音电话，见2.1.7节。在IMS中，控制面和用户面是分开的，今天在CS核心网络中亦是如此。资源优化的重点是实现控制平面资源的高效利用，以及基于之前定义参数的网元之间的负载均衡。控制平面网元可以汇聚在一起，采用一个控件节点从池中选择最合适的网元为客户服务。在IMS网络中，控件网元是服务会话控制功能（S-CSCF）实体，选择功能位于代理CSCF（P-CSCF）中。当一个用户登记到基于IMS的语音核心网时，P-CSCF负责选择一个S-CSCF为客户服务。在CS网络中，移动交换中心（MSC）服务器是控件元素，网络的NAS节点选择功能（NNSF）可能驻留在媒体网关（MGW）或RAN节点（3GPP TS23.236，2009）。当一个用户注册到基于CS的语音核心网时，NNSF将选择MSC服务器为用户服务。

为了确定控制平面网元间的正确平衡，必须收集控制平面网元的资源使用级别或它们所使用的资源情况。这些数据可能是访问位置寄存器（VLR）的利用水平、CPU负载或者链接容量利用率等的实例。从收集的数据可以分析和决定正确的平衡，该平衡将新用户分配到控制平面网元池。对此，SON将调整在NNSF上的负载均衡参数。通过实现此自动化过程，可以全面平衡控制平面池中各网元之间的资源利用率，避免在语音核心网的各部分出现堵塞情况。图8.7显示了MSC服务器的资源平衡。

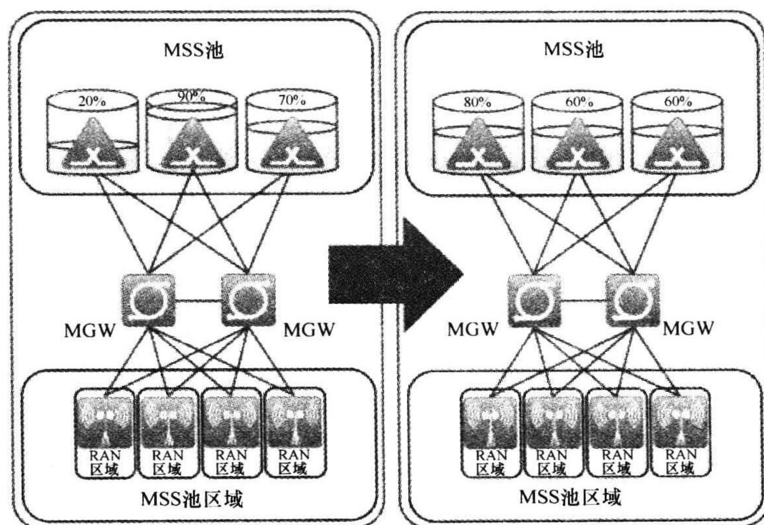


图8.7　基于资源使用优化的池化MSC服务器间均衡

参考文献

3GPP TS23.236 (2009) Technical Specification Group System Architecture, *Intra-domain connection of Radio Access Network (RAN) nodes to multiple Core Network (CN) nodes*, ver.9.0.0., Release 9, 14 December 2009. Available from http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/23_series/23.236/23236-900.zip [accessed 30 June 2011].

3GPP TS26.114 (2010) Technical Specification Group System Architecture *IP Multimedia Subsystem (IMS); Multimedia telephony; Media handling and interaction*, ver.9.3.0., Release 9, 18 June 2010. Available from http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/26_series/26.114/26114-930.zip [accessed 30 June 2011].

3GPP TS23.060 (2011) Technical Specification Group System Architecture *General Packet Radio Service (GPRS); Service description; Stage 2*, ver.9.8.0., Release 9, 28 March, 2011. Available from http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/23_series/23.060/23060-980.zip [accessed 30 June 2011].

3GPP TS23.401 (2011) Technical Specification Group System Architecture, *General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) access*, ver.9.8.0., Release 9, 28 March 2011. Available from http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/23_series/23.401/23401-980.zip [accessed 30 June 2011].

3GPP TS36.413 (2011) Technical Specification Group Radio Access Network, *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); S1 Application Protocol (S1AP)*, ver.9.6.1., Release 9, 6 May 2011. Available from http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.413/36413-961.zip [accessed 30 June 2011].

3GPP TS29.303 (2011) Technical Specification Group Core Network and Terminals *Domain Name System Procedures; Stage 3*, ver.9.4.0., Release 9, 15 June 2011. Available from http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/29_series/29.303/29303-940.zip [accessed 30 June 2011].

Katz, D. (2010) Bidirectional Forwarding Detection (BFD), IETF RFC 5880.

第 9 章　SON 运行

Tobias Bandh、Haitao Tang、Henning Sanneck 和 Christoph Schmelz

在传统的网管系统中（Laiho 等人，2006），网络运营商通过网络运维人员之间的配合和对系统的操作来完成网络的运行和优化。一线的网维人员需要很好地掌握网络设备中运行的配置、优化和纠错的整个流程。这种宏观的把握融合了网维工程师的运维经验和对所检测问题进行严重性判断的能力，避免了各项操控活动相互影响的负面效果，从而使网络维持在一个可运行的稳定状态。

另外，效率对网管系统来说是十分重要的，应该保证尽可能地迅速处理检测到的故障。除此之外，网络优化也是非常重要的。当需要执行不相关联的网管行为时，就要考虑其潜在的冲突问题：需要有效避免冲突的发生，或采取相应手段确保其对系统性能不会造成影响。

在具备 SON 功能的系统运行过程中，自主的 SON 功能执行层面（非人工层面）需要应对双重的挑战，见 3.2 节和参考文献（SOCRATES，2008）。前面的章节主要介绍了独立的 SON 自配置、自优化和自愈功能，同时也简单提到了这些 SON 功能之间一些潜在的负面相互影响。一些早期的研究（Doettling 和 Viering，2009；Baliosian 等人，2006；Strassner 等人，2006；Calder 等人，2002；Cleaveland 和 Smolka，1996）也同样发现这些挑战并研究了类似的问题。因此，目前业界普遍认为，需要增加系统级的自动化方法来管控这些独立的 SON 功能（SOCRATES，2011；Schmelz 等人，2011；Barth 和 Kuehn，2010；Sanneck 等人，2010）。同传统的网管系统相比，这些措施旨在获得一个更加稳定、高效的性能水平。

9.1 节将总体介绍 SON 功能相互影响的表现并举例描述一些特定的 SON 功能间的相互作用。在 9.2 节将会给出一些具体的 SON 功能相互影响的处理措施，将重点研究在保证系统总体效率的前提下，通过怎样的方式来处理 SON 功能之间的相互影响（尤其是在系统存在大量冲突功能的情形下）。

除了需要解决功能间的相互影响外，在 SON 功能运行时还有很多方面都需要考虑，例如 SON 功能行为的跟踪记录，基于运营商策略的 SON 目标设定等。然而，这些方面还没有在 SON 研究组织中讨论解决。

而将 SON 功能融入实际的网络维护操作中，是需要根据运营商的实际部署来确定的，因此本章对这部分内容不再介绍。

9.1　SON 功能的相互影响

为了更好地描述 SON 功能间的相互影响，需要定义以下概念：

1）SON用例：用于描述“谁”能做“什么”，体现系统内部的自组织概念。

2）SON功能：SON用例所描述的自组织概念的特定实现。

3）SON功能实例：用来例示在特定网络环境中SON功能的具体运转流程。SON功能实例包括监测能力（在SON功能运营时激活）、数据采集、数据分析、决策和执行能力。

SON相互影响指的是一个SON功能实例（实例A）影响到另一个SON功能实例（实例B）的情况。这种情况下，实例B的原始操作受到影响，相应的系统性能也有可能将无法达到预计的效果（或无法满足运营商的策略）。当两个SON功能实例在空间和时间的分布上具有相关性时，这种相互影响便有可能出现（参考3.4节）。SON功能间的相互影响可能会降低网络系统的性能。这种“消极的相互影响”我们称为“SON功能冲突”。由实例A引起的SON功能冲突有如下可能：

1）修改了实例B对网络的操作和改动；

2）通过影响实例B的触发测量错误的触发实例B；

3）通过影响测量和输入参数错误的影响实例B的判决；

4）阻碍实例B的执行；

5）取消实例B下一步的操作行为；

6）删除和减少实例B产生的性能增益。

当然，有些影响是由于SON系统和功能特定的部署造成的。例如，相应的锁定或删除机制也会阻碍或删除SON功能实例。

9.1.1 空间特性

每一个SON功能实例的触发都会影响一个或一组网元，如网络中的一组小区。SON功能实例对网络的改动将会直接影响这些小区，这些小区就成为了这个SON功能实例的作用区域。除作用区域外，经常会有一些额外的网元和小区会对SON功能（尤其是SON功能的协作）产生重大作用。有可能是由于它们直接提供了SON功能的输入信息，或者因为这些网元在SON功能运行时发生了变动，因此导致SON功能计算出错误的结果。作用区域和这些额外的网元共同构成了SON功能实例的影响范围（SON功能的空间范畴详见3.4节）。

图9.1描述了一个由SON空间特性导致的功能冲突示例。SON功能实例A修改了NEⅠ的配置，这些改动将影响NEⅡ和NEⅢ。此时SON功能实例B又修改了NEⅡ的配置，因此在NEⅡ处产生了冲突。另外，SON功能实例C修改NEⅣ的配置也会对NEⅢ产生影响，又会导致另一个冲突的出现。

9.1.2 时间特性

第二个对SON协作产生巨大作用的特性是影响时间。从SON功能实例的开始到影响时间的结束（假设此时间段内实例一直处于激活状态），协作决定的制定都要考虑SON功能实例的影响。在这个时间点之后，该功能实例便不会对后续的SON功能实例造成影响。需要注意的是在上述空间特性的讨论中，已经对各功能实例重合的影

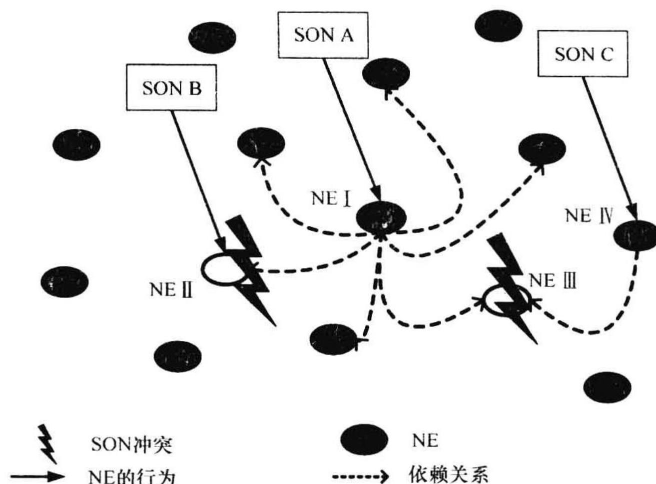


图 9.1　SON 功能实例冲突：空间特性

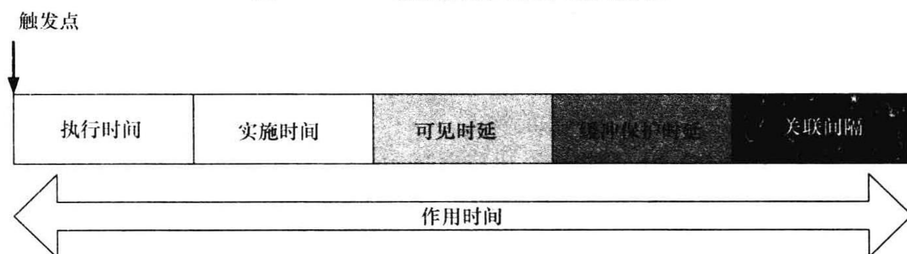


图 9.2　时间特性：作用时间组成

响时间做了设定。

影响时间（详见 3.4 节对时间要求的讨论）包含着多个因素。这些因素的大小与具体的 SON 功能相关联。下面简要介绍一下影响时间的组成：

1）执行时间：从 SON 功能实例开始直到 SON 算法计算出新的参数值为止。

2）实施时间：从 SON 功能实例开始直到所要求的配置更改在网元上生效为止。

3）可见时延：SON 功能实例造成的更改需要一段时间才能体现到相关 KPI 上呈现。从配置更改应用到相关 KPI 的体现这段时间定义为可见时延。

4）缓冲保护时延：一些 SON 功能使用 PM 数据作为输入信息。缓冲保护时延用来确保使用的输入信息能够反映真实的网络状态，并且之前所有的网络更改都已经可视，即可视时延已经过期。根据特定 SON 功能的要求可以调整缓冲保护时延的大小。

5）关联间隔：一些 SON 功能实例做出的改动可能会在很长时间内对后续的 SON 功能实例造成影响。这段时间可以用关联间隔来表示，可以有效避免振荡配置。因此，关联间隔对于 SON 实例间的协作也是非常重要的。

需要注意不同的时间因素同 SON 的功能以及 SON 运行的环境都有很大关系，如和 NE 类别有关。对于某些 SON 功能，这些间隔时间也有可能是 0 或者无穷大。例如，PCI 的更改就是即时可见的更改（可见时延为 0）。

此外，需要注意的是，SON功能相互影响总是带有方向性的，如上述的实例A对实例B的影响。从实例A到实例B的相互影响不代表从B到A也会产生影响。即便从B到A也存在着相互影响，那么这种影响也应该与从A到B的相互影响做出区别处理。

图9.3中显示了SON功能冲突的时间特性。在A的影响时间内，SON功能B与SON功能A修改相同（或相同系列）的配置参数（根据表9.1，其冲突类型为A2，详见9.1.3节）。

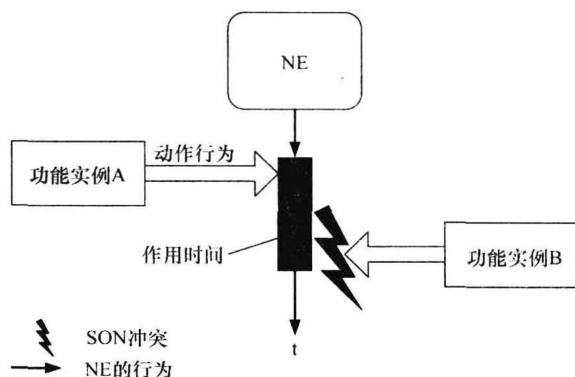


图9.3　SON功能实例冲突：时间特性（Bandh等人，2011）

表9.1　SON冲突类别

类别	冲突	描述	示例
A	配置冲突	由于参数改变造成的冲突	
A1	输入参数冲突	网络中一些参数值需要依靠其他参数来确定。处理这类参数的SON功能往往需要依靠稳定的读取参数来计算新的参数配置，因此有可能将会面临输入参数冲突的情况。读取的参数在SON功能计算过程中发生改变会导致错误的配置结果	PCI分配（参考4.2.1节）：收集邻小区的PCI配置，基于此确定目标小区的PCI信息。但如果在PCI功能运行过程中邻小区的PCI发生了变化，那么最终结果会出现失误
A2	输出参数冲突	当SON功能实例在另一个功能实例的作用时间内修改配置参数时（该配置已经或正在被其他功能实例操纵），将会造成输出参数冲突	见后叙的示例
B	测量冲突	由于测量值的改变而造成的冲突	
B1	测量冲突	一方面，测量会触发SON功能算法的执行，另一方面，测量也将成为SON算法的输入信息，用于评估目前的系统状态，推导出适当的配置/行动来达到预期目标。系统参数的改变会影响测量，但会有一定的生效时延。如果SON功能利用实际上已经“过期”的测量来触发或计算新的参数值时延就会引起冲突	见后叙的示例

（续）

类别	冲突	描述	示例
C	特性冲突	由于小区特性的改变而造成的冲突 特性是小区中很难或无法测量的属性，如小区大小 KPI 是由一个或几个测量值计算得出的公制度量	
C1	直接特性冲突	两个 SON 功能实例通过修改不同的参数来修改小区不同的 KPI，但有可能会影响相同的小区特性。这种冲突无法归类为配置参数冲突，只能通过目标量度的改变检测出来。因此，这需要在测量阶段明确定义度量相关的特性	下行传输功率和天线电倾角都会影响小区大小
C2	逻辑依赖性冲突	SON 功能用到不同的度量之间如果存在逻辑依赖性，将会引起此类冲突	见后叙的示例

9.1.3 SON 冲突类别

表 9.1 列出了不同类别的 SON 冲突和对应示例。

9.1.3.1 冲突类型的示例

SON 功能实例 F1 和 F2 有可能会针对它们共享的参数形成竞争性调整。在图 9.4 中，功能实例 F1 要求提高切换参数“Qoffset”，而功能实例 F2 在不久后又要求降低这个切换参数。如果没有协作机制的话，这些功能的相互影响将会造成该参数振荡调整，从而带来不理想的优化效果。

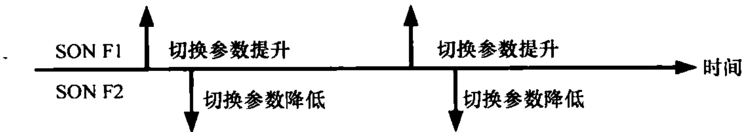


图 9.4 不同功能实例之间的参数竞争

9.1.3.2 B1 冲突类型的示例

两个或两个以上 SON 功能实例（F1、F2 或更多）有可能在不同的时间范围上产生竞争。在图 9.5 中，功能实例 F2 的行为可能会造成 F1 的判决测量值扭曲失真。

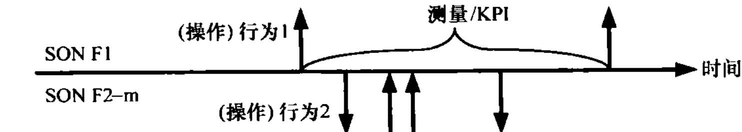


图 9.5 不同功能实例之间的测量冲突

9.1.3.3 C2 冲突类型的示例

图 9.6 说明了两个功能实例有可能相互抵消彼此的性能增益，如示例 F2 执行

CCO操作，包括修正下行发射功率和调整电倾角，因此会对小区大小产生影响。示例F1（如MRO和MLB）将会修正切换偏置参数，因此更改了切换门限。这两种功能共同运行时，F2有可能取消F1对切换参数的优化修改。这是因为F1改变了小区大小后，相邻小区的重叠覆盖区域也发生了变化，所以对F1的小区负载会产生影响（同时切换过程也会发生得更早或者更晚）。这样造成的最终结果是F2对网络的改动抵消了F1带来的性能增益。

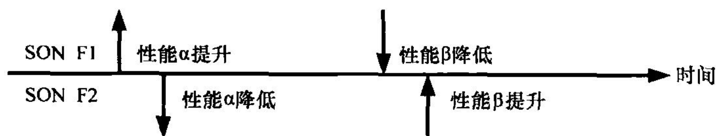


图9.6　两个功能实例之间的逻辑依赖性冲突

6.4节也描述了另一个相似的例子：小区失效补偿功能（Cell Outage Compensation，COC）的运行会改变小区大小，有可能会造成PCI算法计算出的小区信息失效或过期。

9.1.4　SON功能相关的网络参数

在LTE自组织网络中有很多网络参数都与SON功能相关（大约有几百个参数，而且大部分的参数基本不变化）。在这些参数当中，有一小部分参数是至关重要的，如小区相关的ID信息、射频发射功率等天线参数，无线信道参数，相邻小区参数（详见4.2节），移动性参数（详见5.1节）或者小区活动状态（详见5.3.5节）等。图9.7显示的一些网络参数直接与两个或两个以上的不同SON功能相关，这些参数的输入和输出都有可能被这些SON功能所共用。在图9.7中，实线箭头代表SON功能的主要参数，虚线箭头代表SON功能的相对次要参数。图片描述了一个SON功能通过共用网络参数与另外的SON功能相互影响的可能性。

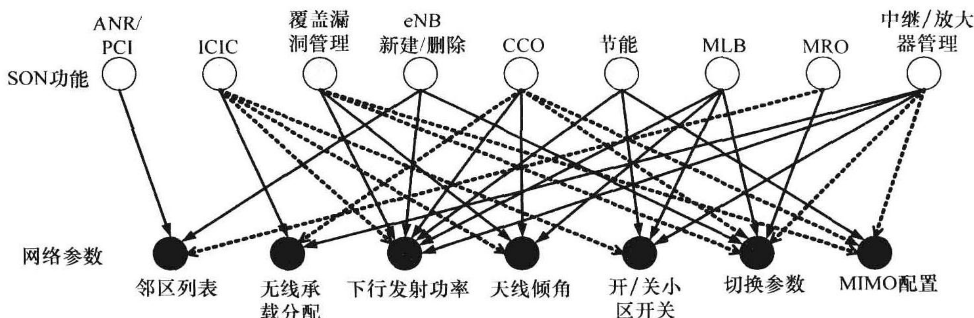


图9.7　不同SON功能之间共享的配置参数

事实上，不仅相同的参数需要考虑，而且不同的参数也有可能影响小区相同的物理特性（如发射功率和电倾角都会影响小区覆盖一样，参考表9.1冲突类别C），因此实际的情况比图9.7所示的更加复杂：由于不同参数也会影响共用的物理性能，

一个 SON 功能也有可能影响另一个 SON 功能。

9.1.5　SON 功能间冲突举例

本节将给出一些 SON 功能间冲突的示例，这些示例可以更细致地解释上面的冲突类别。

9.1.5.1　PCI 功能实例之间的 SON 冲突

在同一个网络的同一时刻，有可能会存在两个或两个以上的物理小区标识（Physical Cell ID，PCI）自动分配的功能实例在运行。当插入新小区后，需要为新的小区分配 ID，周围小区为避免小区 ID 冲突也有可能要更改 ID 配置。这些情况都会触发 PCI 功能实例。

在空间上分开但在时间上连续的 PCI 功能实例也有可能会引发冲突（小区 ID 冲突或混淆）。如图 9.8 所示，如果 PCI 功能实例 Ⅰ 和 Ⅱ 之间没有协作机制的话，PCI 功能实例 Ⅱ 有可能会分配 PCI 功能实例 Ⅰ 已经分配过的物理小区标识。这样小区 X 将无法区分两个或两个以上拥有的相同 Cell ID 的相邻小区。根据表 9.1 分类，这个叫做输入参数冲突（类别为 A1）。

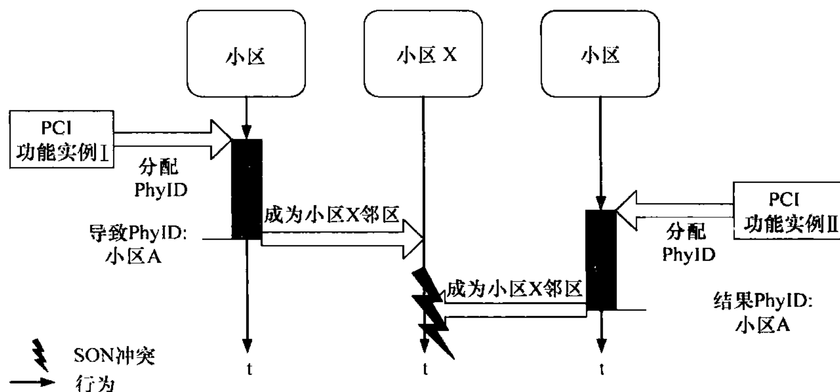


图 9.8　两个 PCI 实例之间的冲突

根据 PCI 算法的执行时间，冲突的影响时间由“小”到“中”不等。由于插入一个宏小区或者更新 PCI 的需求的概率不高，所以冲突的可能性会较小。但是，如果网络场景中包含了大量的微小区的话（尤其是需要频繁开关的 Femto 小区），冲突可能性将会相应增加（详见第 10 章）。而小区 ID 的冲突或混淆会使小区无法工作或者无法切入，因此会对网络造成严重的影响。为了有效避免或者解决这种潜在的冲突，需要在功能运行时引入协作机制。

9.1.5.2　MRO 功能实例和 MLB 功能实例之间的 SON 冲突

如图 9.9 所示，假设 MRO 功能和 MLB 功能是独立设计的，而且在分别的运行过程中没有协作机制来协调，那么两者在运行过程中将会发生严重的冲突。预计的网络性能的改善会因为这些功能之间的冲突而相互抵消。5.2.7 节简单地描述了一下 MRO 和 MLB 功能的相互影响。根据表 9.1 可以看到，这种冲突可以归类为输出参数的冲

突（类别A2）。

如果没有协调机制，MRO和MLB功能冲突的发生概率将会很高，其影响也是非常严重的。为避免冲突发生，一般有两种方法：在运行时，为两个功能准备一套完善的协作机制；在SON功能设计时，将两个功能直接整合设计在一起。

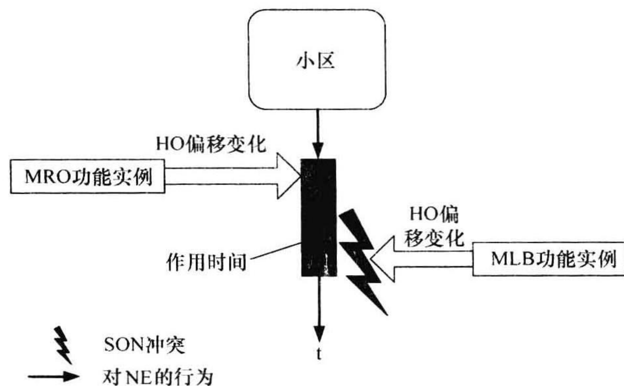


图9.9 MRO和MLB功能实例之间的冲突

9.1.5.3 MRO功能实例和CCO功能实例的SON冲突

根据CCO算法的计算结果，CCO功能实例通过调整天线的电倾角来实现对小区的优化。CCO功能的可见时延较长。如图9.10所示，在CCO功能的可见时间内，MRO功能实例根据这段时间搜集的测量结果计算出新的切换参数并据此修改了网络参数。然而，CCO功能对天线电倾角的修改已经改变了小区大小和偏置参数，所以当MRO与CCO之间没有协作机制时，MRO便会利用错误的输入信息进行判决。根据表9.1可以看到，这种冲突可以归类为测量冲突（类别B）。

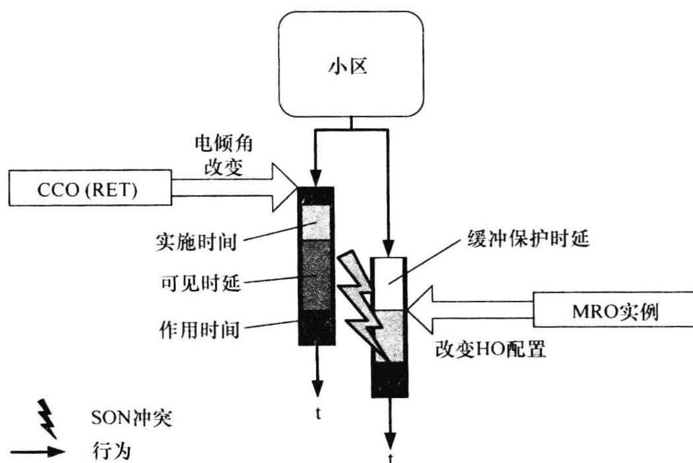


图9.10 CCO和MRO功能实例之间的冲突

由于 CCO 的可见时延较长，因此当如 CCO 和 MRO 之间没有协作机制的话，这两种 SON 功能冲突的可能性会较高。而且不合适的切换参数也会引起诸多切换问题，如切换失败和乒乓切换，因此冲突的影响也会十分明显。

9.1.5.4　CCO 功能实例间的 SON 冲突

除了 CQI 和 RSRP 这些关键参数外，优化天线电倾角［CCO（RET）］的 CCO 功能同优化发射功率［CCO（TEP）］的 CCO 功能仅共用很少的输入参数。这些功能的触发机制有部分差别，而这些功能的输出参数更是截然不同。但是，由于电倾角和 TX 功率会产生相似的效果，所以这些输出参数将影响作用小区相似的射频性能。例如，下调电倾角和降低 TX 功率都会减小小区覆盖范围，而上调电倾角和降低 TX 功率的共同运行时将会抵消彼此的效果。如果 CCO（RET）执行水平的波束转向的同时也在更改小区 TX 功率，那么相互影响的情形可能更加复杂。目前，CCO（RET）和 CCO（TXP）作为独立（非协作）的小区 SON 功能实例来设计和执行，因此这些功能实例之间将会发生严重的冲突。值得注意的是，由于 TX 功率改变和电倾角调节的可见时延和关联间隔较长，因此这些 SON 功能实例也会产生长时间的影响。

在 SON 功能重叠的作用区域中，如果 CCO（RET）和 CCO（TXP）功能同时触发并且同时更改各自的小区射频参数，那么这些功能之间会产生严重冲突。它们虽然不更改相同的参数，但是会影响相同的小区性能，如小区大小。根据表 9.1 可以看出，这种冲突可以归类为直接特性冲突（分类 C1）。

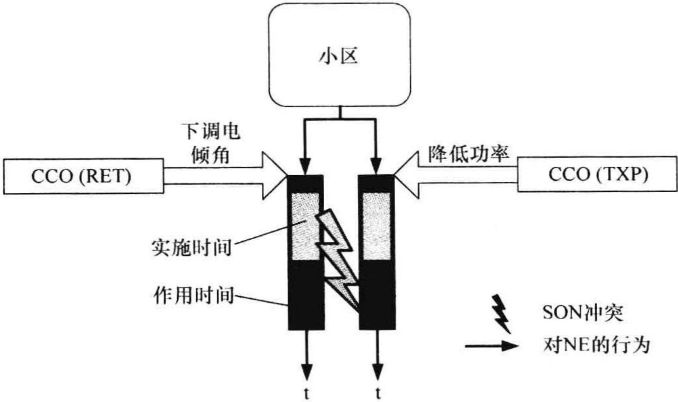


图 9.11　两个 CCO 功能实例之间的冲突

9.1.5.5　CCO 和 MLB 功能实例之间的 SON 冲突

A 小区的 CCO 功能实例将修改发射功率和电倾角，因此会对小区的大小造成影响。小区大小是个很难测量的特性，因此很难直观地从测试中得出。同时，运行在邻区 B 上的 MLB 功能通过修改切换滞后来调整小区 A 和小区 B 的负载分布。然而，CCO 功能对小区 A 大小的修改使得邻小区 B 的重叠覆盖区域发生了变化，那么显然会对于切换滞后参量造成影响，这就造成了 MLB 有可能会对小区 B 的相关参数执行错误的修改。例如，MLB 功能修改切换滞后参数后，切换触发门限会与小区 A 的 CCO 功能修改的小区重叠区域不一致，如图 9.12 所示。如果在邻区中 CCO 和 MLB

的功能无法协作的话，这些功能的作用有可能会相互抵消掉。而且，这种情况往往很难由 SON 功能测量和辨认出来。根据表 9.1 可以看出，这种冲突可以归类为逻辑特性冲突（分类 C2）。

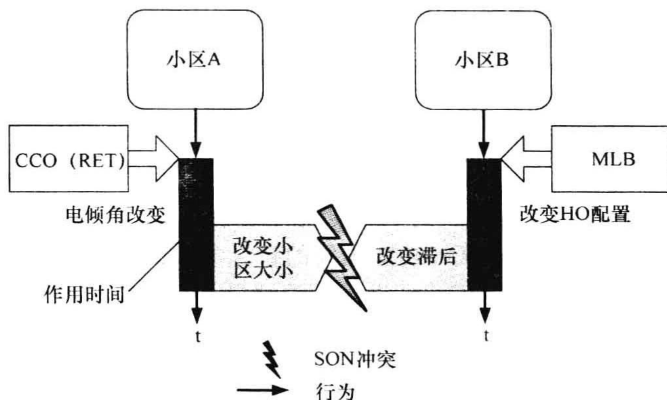


图 9.12　CCO 和 MLB 功能实例之间的冲突

由于 CCO（RET）的可见时延很长，而 MLB 又无法识别出这种变化，因此如果没有协作机制，CCO 与 MLB 之间的冲突概率会较高。而且小区中不合适的切换参数也会引起一些切换问题，例如切换失败和乒乓切换，因此冲突的影响也会较为明显。

9.2　SON 功能协作

9.2.1　SON 协作的基本选项

理论上讲，既要保证所需的 SON 功能相互影响生效又要阻止或解决 SON 功能间的冲突一般有两种方式：SON 功能联合设计和 SON 功能间的协作。两种方式殊途同归。

以下内容将介绍两种方式的基本原理。我们会逐渐看到，单独任意一种解决方式都是不够充分的，而将两种方式结合在一起就可以形成一个较完善的互补关系。

9.2.1.1　SON 功能联合设计

运行中的 SON 功能实例间的冲突是很难检测和处理的。如果可能的话，在“设计阶段”（在制作或准备 SON 功能时，运作流程和运营商策略已经包含其中，参考 3.6 节）就要考虑避免 SON 功能间冲突作用。9.1 节介绍了 SON 功能间冲突的根本原因是这些功能修改的一些参数间彼此相关联或具有相同的输出特性。

SON 功能的联合设计旨在从设计上保证 SON 功能在运行时不会彼此产生冲突。

SON 功能的联合设计需要遵守以下原则：

1）提前明确网络参数对 SON 功能的作用和影响，通过这种手段来最大可能地减少 SON 各功能的共用参数。

2）如果需要的话，将几种 SON 功能融合到一个单一的功能中，如设计一个优化

功能来同时优化几种目标参数，从而代替几种单一目标的 SON 功能。

3）将 SON 功能联合设计为一个“功能群（集）”可以提前排除 SON 冲突。在这个功能集里面，通过规定运行时的互动来保证这些 SON 功能之间无冲突行为。MLB 和 MRO 的联合设计就是一个典型的 SON 功能联合设计的实例。在 9.1.5.2 节中曾介绍 MRO 和 MLB 在独立执行时，有可能会彼此抵消各自产生的性能增益。而在联合设计中，MRO 会设定一个合适的参数调整区间，MLB 仅在该区间内修正网络参数。

4）尽可能利用这些功能之间的相互影响，要确保这些相互影响不会受到其他因素限制。

从图 9.13 和图 9.14 中可以看到 SON 功能联合设计的结果。图 9.13 显示了 SON 功能的集合，不同的形状代表 SON 功能不同的目标参数，可以看到多个功能都采用相同的目标参数。图 9.14 显示了联合设计后的结果：共用的参数减少了，这些 SON 功能可以分成 3 个功能集：

1）规定运行时互动的功能集。这些功能的目标参数相同，需要彼此互动来避免冲突。

2）两种功能融合成一个单独的功能，但完成两个功能的任务。

3）这种功能集将原本相关联的目标参数进行处理，改用完全分离的目标参数集。

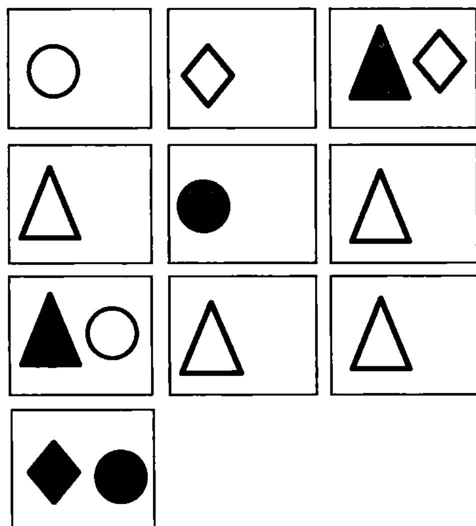


图 9.13　SON 功能之间无联合设计

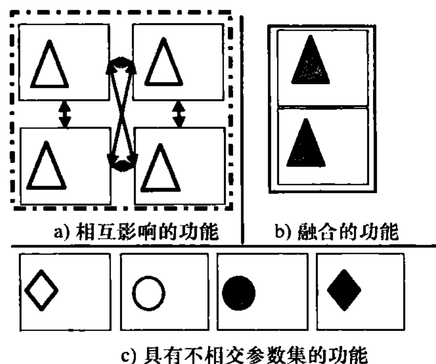


图 9.14　联合设计的 SON 功能

如果自组织网络中仅有几个 SON 功能，那么 SON 功能的联合设计无疑是一个简单且最有效的方法。

当已部署的 SON 功能不断增长或是在运行过程中原先部署的功能发生改变时，SON 功能的联合设计在处理功能运行冲突时便遇到了瓶颈。引入另外的 SON 功能需要重新设计已部署应用的功能，这将增加总的开销并有可能在功能之间引入新的依赖

关系。虽然理论上所有 SON 功能都可以设计使用分离的参数集，但主要的困难在于，不同途径的（只做轻微调整或不做调整）SON 功能是无法完成联合设计的。

另外，有一些 SON 功能的属性和要求是很难通过联合设计来实现的。SON 功能的联合设计主要是依靠对相关参数、KPI 和测量结果的系统分析。而对于特性冲突的 SON 功能（例如表 9.1 中的类型 C）便很难通过上述方式解决。如果将这种情况强制进行联合设计，那么差别很大的 SON 功能将融合成一个功能，或者在运行过程中出现大量的通信开销。而这两种设计思路都有悖于 SON 的基本思想——独立的可操作应用的自组织功能。

有一些以网络优化为目标的 SON 功能和以网络错误检测为目标的 SON 功能均使用相同的网络参数。因此，这些功能之间很有可能会出现冲突情况。如 CCO 功能（见 6.4 节）会尽快重建全覆盖网络，这样便会与一些以均衡网络负载分布为目标的功能相冲突。如果 SON 功能在进行优化时出现了小区失效的状况，那么即使出现了功能冲突也要优先进行故障恢复。

参数分析可以揭示这种冲突。这些冲突的功能是可以同时存在的。为了实现联合设计来解决类似冲突，设计者必须意识到这些冲突无法在参数层面上得以解决。解决方案或者是建立一个融合的 SON 功能同时执行失效恢复和优化功能，或者是在这些功能运行时引入互动机制来避免冲突。

但是，即使无法单独通过联合设计来完全解决冲突，这种设计原理也可用来大幅降低潜在的 SON 冲突。SON 功能的协作机制可以有效降低需要分离处理的冲突数量，有利于运行时的冲突解决。

9.2.1.2 联合设计示例：共用的触发条件导致的 SON 功能冲突

图 9.15 显示了采用联合设计来消减冲突的典型场景，图中显示了很多的 SON 功能（F1 ~ Fn），这些 SON 功能用于解决网络中潜在的各种问题，而这些问题都产生一个相同的效果：它们都会造成大量的切换失败。因此，在设计阶段，将这种切换失败的现象设计为 SON 功能执行的触发条件。假设设计者没有意识到这个潜在的问题，仅采用切换失败率作为惟一的 SON 功能触发条件，那么当切换失败率提高以后，所有的 SON 功能都会激活。每种功能都将独立运作，力图解决切换失败现象。

在这种情况下，很有可能一些 SON 功能没有解决真正的问题，并且使得真正有效地解决方案很难执行、生效。因此，要想有效地解决问题，第一步要仔细规划联合设计方案，采用多个测量值作为 SON 的触发条件。在联合设计完成后，大多数的 SON 功能都会采用独立的触发条件。对于少数那些无法分离触发条件的功能冲突，也可以利用网络运营商的具体策略协调解决。

9.2.1.3 SON 功能协作

如果联合设计无法有效解决系统中的功能冲突问题，那么下一步就要通过 SON 功能的协作操作来实现，而协作操作不仅仅是一个概念这么简单。

引入 SON 功能的协作机制有两个原因：一方面，可以通过低层次自动化的协作操作 SON 功能来阻止或解决 SON 功能冲突；另一方面，同时可以将运行中的 SON 功能交给人工控制，这样无需人工和管理系统的频繁交互，即可在实现高层次的网维需

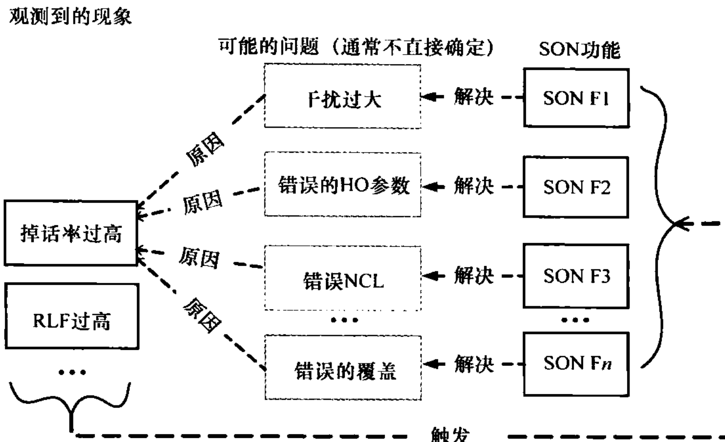


图 9.15　共享触发条件件造成的 SON 冲突示例

求上对 SON 功能行为进行管控。

运营商网维需求明确了 SON 功能执行的基本原则。运营商很有可能会制定各种各样的准则，如不同的场景中 KPI 代表着不同的解释、在城区/乡村采用不同的判决门限等。作为 SON 功能协作的输入，这些运营商的要求决定了具体的网络行为是否需要，并将在特殊的场景中执行不同的 SON 功能。

所有决定的制定都是基于运营商的需求并综合考虑目前的网络环境的。SON 功能协作可以决定 SON 冲突的处理方式，如是否需要对某一片小区继续进行优化，或者由于对小区失败的恢复有益，小区大小的改动应优先执行等。

怎样阻止（或解决）运行时 SON 功能之间潜在的相互影响和冲突，是 SON 功能协作的出发点和立足点。而相关检测和解决的办法也是根据具体的网络环境和 SON 功能的属性来制定的。

SON 功能协作的主要思想服从以下原则：

1）SON 协作功能完全控制 SON 功能实例的执行。这里“协作功能”代表执行逻辑协作的实体功能。与设备层面的集中式、分布式实现无关。

2）协作功能需要解决部分或全部 SON 功能实例的执行所造成的冲突。

3）协作功能可以通过正在运行的实例中进行优先级排序来优化一个 SON 功能实例。

4）SON 功能协作判决取决于运营商的需求（如运营策略、SLA 等）、网络当前状态和 SON 功能的相关特性。

SON 功能协作为功能冲突提供了一个强有力的解决手段，可以有效地解决联合设计无法阻止的冲突情形，同时也提供了一种对运行的 SON 功能的管控方法。但是，对于较简单的 SON 网络来说，功能协作可能会同时带来较大的资源开销。

9.2.2　SON 功能协作的目标

根据上述章节的介绍，协作功能的任务是对 SON 功能的执行进行协调，目的

如下：

1）阻止不必要的SON功能冲突。

2）支持有用的SON功能之间的相互协调。

功能协作是实施管理目标和运维策略的很好的方式，同时也保证了SON系统整体的高性能运作。本质上，SON功能协作将系统的不同部分连接在一起，同时允许不同运营商对SON功能进行各种限制。通过这种方式，SON功能协作实现了一个自动化的网络管理系统。

1. 运行保护是最明显的协作任务

需要保护运行中的SON功能实例，避免其受到其他SON功能实例的负面影响。

对于SON功能实例的执行要求，协作机制需要评估目前的网络环境和要求执行的SON功能实例的属性。只有当要求执行的SON功能实例不会对网络中正在运行的其他功能实例造成负面影响时，执行请求才能获得批准。

2. 前瞻性保护用来避免未来潜在的冲突

一个请求的功能实例有可能受到已经存在的功能实例的负面影响。另外，前瞻性保护也用来保护未来的SON功能实例。一个SON功能实例对网络修改后，往往需要接下来一些特殊的功能实例共同运行来维持整体网络配置的一致性。目前实施和以后实施的功能实例间的冲突有可能会阻止后续功能实例的执行。如果了解了这种情况，那么协作的决定就可以前瞻性地保护未来的功能实例。未来冲突的典型案例有“死锁现象”或者由于影响范围的扩大而造成的基于优先级的功能实例中止。如果目前运行的功能将会触发另一个影响范围更大的功能，对请求的和后续的功能实例产生影响，那么协作功能将会做出适当的判决来阻止冲突的发生。相比运行的功能实例和请求的功能实例之间的冲突，与未来功能实例之间的潜在冲突更难以掌控。为了采用协作机制来实施前瞻性的保护，在协作机制设计阶段就需要包含典型的功能序列和功能特性。

3. 管理目标实施

每个网络运营商都有高层次的管理目标，用于管理整体网络操作，如“全网覆盖优化优于网络负载优化”。网络失败恢复和网络优化功能之间的冲突解决也需要这种总体的策略。这种协作功能通过给出功能优先级来实现高层次的管理目标。另外，协作机制也可以实现其他的运营策略，如参数的最大化改动范围等。

4. 协作机制也可以实现高效的SON系统

一些单独的协作区域有助于总体系统性能的提升，这其中最重要的是平行化处理，协作功能就像是一个智能的调度器。在一个拥有数以千计网元的网络环境中，在广泛的区域中只要不存在交叉的作用范围，几个冲突性的SON功能是可以并行执行的。当没有潜在的冲突时，应该批准并行SON功能的执行请求，从而更好地提高网络运行效率。还有一点也是非常重要，那就是SON预期功能的实现程度。SON的预期功能是否都能实现或者能实现到什么程度，这都直接影响了系统的效率。9.1.3节中已经介绍了几种常见冲突。运行保护、前瞻性保护和基于运行策略的管理目标实施都有着共同的目标：

1）有些 SON 功能的执行会抵消先前对网络的改动。通过阻止此类功能的执行来保护已有的效果。

2）拒绝一些不必要的 SON 功能，这些功能将会与未来高优先级的 SON 功能发生冲突。为了避免这种可以预见的不必要的冲突，最好是提前拒绝该功能的执行请求，从而获得较高的整体系统效率。从图 9.16 中可以看到，当 SF2 要求执行时，SF1 处于活动状态。在 SF2 触发了 SF3 后，SF1 仍将处于活动状态。然而 SF1 和 SF3 的执行存在着冲突，为了避免这种潜在冲突，协作机制一般不会立即批准 SF2 的执行，而是将 SF2 的执行请求完全拒绝或推后到无冲突的时间段。

综上所述可以看出，协作功能中严密的协作逻辑（算法）使网络操作者可以更好地控制 SON 功能的执行情况，而无需频繁地操作系统。当处理功能冲突和执行运营策略时，协作机制将会自动辨别出尽可能多的并行 SON 功能。网络操作者的特定需求和没有冲突风险 SON 功能将不会受到协作功能的限制。

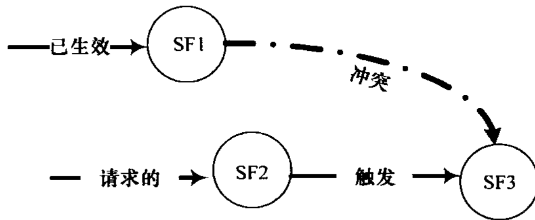


图 9.16　已生效和后续触发的 SON 功能之间的冲突

9.2.3　SON 协作功能的概念

为了完成 9.2.2 节中提出的目标，需要将这些目标需求融入到 SON 协作功能的概念中。本节将会一步步介绍这种 SON 功能协作概念。首先，将会介绍 SON 功能重要的特性、需求以及功能执行的具体方式。接下来将会介绍怎样通过对 SON 功能的分析得出协作逻辑（算法）。最后，介绍怎样将这种与解决方案无关的抽象算法应用到具体协作功能中。

9.2.3.1　信息需求和效率影响

高效可靠的 SON 功能协作是一个核心挑战。在一个拥有大量网元和多种 SON 功能的网络环境中，协作功能如果需要存储和分析大量的数据，那么很有可能会导致服务质量的下降。因此，协作算法中一个非常重要的设计原则就是“寻找最少量的信息来保证高效可靠的 SON 协作。”

需要根据具体的 SON 功能的输入需求和操作执行来设计方案以解决上述问题。每个 SON 功能的相互影响都需要在设计阶段进行充分分析。分析结果会显示这些 SON 功能可能的相互影响和冲突情况。

3.4 节中介绍的 SON 功能的时空特性是设计阶段最重要的分析输入。基于这些时空特性，9.1 节中介绍了作用区域和作用时间的概念。

协作功能需要首先根据 SON 功能的空间特性来判断是否与其他 SON 功能具有重

叠的作用区域，然后根据表9.1进一步判断重叠区域冲突的可能性。因此，SON功能空间作用区域的信息对协作判断来说是最重要的。

作用时间中描述的时间特性是下一个重要的判断信息（参考9.1节）。根据表9.1，作用时间和潜在的冲突是息息相关的。因此，完成协作判断所需要的最少的信息包括作用区域、作用时间和SON功能间的潜在冲突。

9.2.3.2 SON功能相互影响和判决逻辑

SON功能相互影响和协作的判决逻辑都基于以下信息：

1）作用区域；

2）作用时间；

3）输入参数；

4）输出参数；

5）使用的测量信息；

6）影响的测量信息。

根据表9.1，需要对每个SON功能进行详细分析，以判断其潜在的冲突和相互影响。这种分析需要体现SON功能间所有潜在的相互影响，从而结合作用时间和作用区域来建立判决逻辑。

一个SON功能设计完成后就要开始分析其对其他SON功能的影响。A类和B类冲突（参考表9.1）基本上是可以根据相关的参数和测量值采用自动手段分析出来的。而对于C类冲突的检测就需要深厚的运维经验了。当然，未来一定可以通过更先进的数据和模型自动化地检测出C类冲突。

当明确了潜在的冲突后，就要确定每个冲突功能的作用时间（参考9.1节）。对于正在运行的SON功能，需要确定执行时间、实施时间和可见时间；对于即将生效的SON功能，需要确定保护间隔和关联间隔。即将生效的SON功能没有单独的作用时间，而是和冲突对象成对出现，这是由于保护的缓冲时间是根据实际冲突而定的。与B类冲突不同，A类冲突是不要保护缓冲时间的。这同样适用于作用时间的关联间隔。

在上述过程完成以后，判决逻辑所需要的所有信息都已经准备齐了。SON功能设计者下一步就可以进行冲突处理——通常会根据运营商确定SON功能的优先级或是逻辑依赖性来做出相关的处理决定。

9.2.3.3 决策逻辑的表示

决策逻辑可以通过决策树抽象表示，用于响应SON功能实例的执行请求。决策树能够捕捉功能之间的依赖性和相互影响。对于每种SON功能，决策树都提供了协作决策所要分析的一系列状态。决策逻辑抽象标示的最大优势在于它的抽象直观，不受具体SON功能协作方法的影响。

结合作用区域和作用时间的信息，协作功能利用决策树对SON功能实例做出协作判决。当SON功能执行请求接受以后，协作功能会确定功能实例的作用区域并遍历决策树。图9.17给出了决策树的基本示例。决策逻辑是节点之间的边缘注解，通常情况下，决策逻辑会要求协作功能执行不同类型的评价：

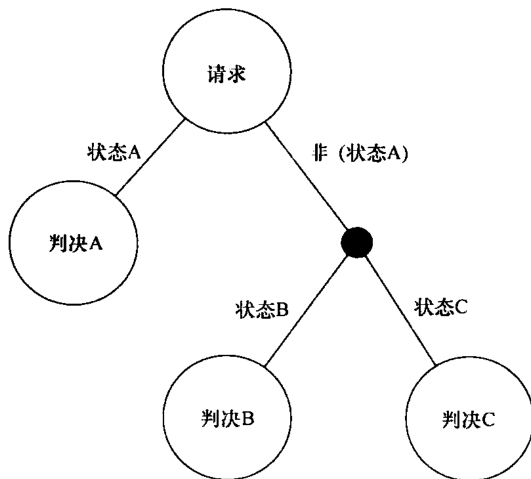


图 9.17　通用决策树

1）检查请求执行的 SON 功能实例的作用区域内有无其他 SON 功能实例。

2）评估在目标网络中，请求执行的网络改动是否与先前执行的网络改动相冲突。

评估状态所需要的信息是很有限的。没有必要保留大量的状态信息，协作功能仅需使用已部署的作用区域/时间有重叠的 SON 功能实例信息即可。对于某些 SON 功能，还需要一些已完成的网络改动信息。相关的信息仅在作用时间内有效。如果在作用区域内没有其他 SON 功能实例的信息，那么 SON 功能实例的执行请求将会立即获得批准。

决策树的树叶包含了判决过程的结果信息，这可以清晰地指示怎样构造决策树以实现高效的判决。一个判决所需要的信息越多，其在决策树上的位置就越往下。可以实现即时判决的决策信息一般都在树的最上层，例如，如果有一个冲突性的 SON 功能正在运行，那么请求执行的 SON 功能将会直接被拒绝，类似这样的判决信息应该置于树根的附近。这种树的形态更有助于对判决逻辑的理解；也有助于加速整个判决过程。

由于不考虑实际使用的技术，决策树大大简化了判决的制定。当 SON 功能实例的执行请求出现时，协作功能只需要遍历决策树直到抵达树叶为止，然后执行相关的判决即可。

可以看到，为了实现成功的 SON 功能协作，决策树的构造无疑是 SON 功能设计中的一个必要组成部分。如果分析显示 SON 功能可能会与已部署的 SON 功能实例发生潜在的冲突，决策树将会重新评估这些功能，以确定是否需要进行功能调整。这种方法可以带来以下重要的优势：判决逻辑对不存在相互影响的 SON 功能不会造成影响。

协作请求中自动地包含了判决所需的所有信息，不需要 OAM 的信息辅助或仅需从 OAM 处获取极少量的信息即可，从而减少了总体的通信开销。例如，上次协作请

求中包含的信息可以在以后的协作判决中继续使用，直到其作用时间过期为止。

通过聚合和组合具有相同的判决逻辑的 SON 功能，可以进一步减少 SON 功能协作所需要的信息量。尽管信息的压缩需要引入新功能，但可以提高协作效率。

需要仔细设计协作逻辑来满足运行需求，以阻止 SON 功能冲突并支持所需要的功能间的相互影响。这种方法同样适用于大量 SON 功能部署的情形。图 9.18 举例描述了图 9.13 介绍的 SON 功能示例。

SON 功能需要获得协作功能的批准才可以执行。当确定不会发生冲突后，协作机制会响应 SON 功能的执行请求，同意 SON 功能实例的执行。

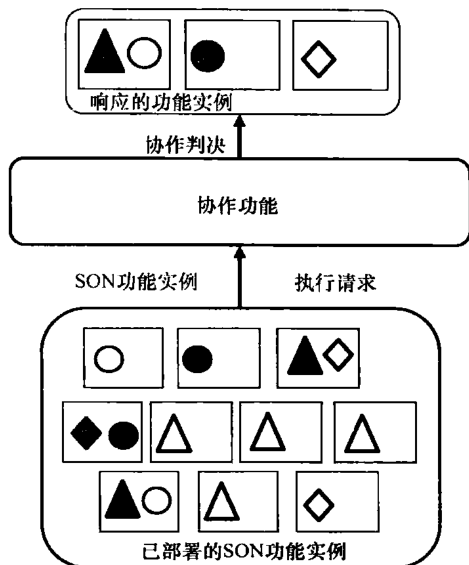


图 9.18　SON 功能协作

9.2.3.4　协作判决

SON 功能协作用于阻止和解决 SON 功能冲突问题。在协作流程最后将会产生一个或多个影响 SON 功能执行的协作判决。本节将主要介绍可能的协作结果及其产生理由。这种选择体现了如何在使判决逻辑简化和使判决结果高效之间达到平衡。

1）SON 功能请求的响应：如果没有检测到冲突的 SON 功能，将执行该操作。SON 功能请求的响应将导致相应功能实例的执行。

2）拒绝：有很多原因都会造成 SON 功能请求被拒绝。一般情况下，此时请求执行的 SON 功能和已部署 SON 功能拥有共同的作用目标或交互的作用区域。请求的 SON 功能在此时不能执行。完全拒绝一个执行请求一般是出于保障高优先级的 SON 功能的需要。

3）重新调度：可以理解为是一个较低层次的请求拒绝。由于网络的上下文环境，协作功能判决请求的 SON 功能目前不能执行，但是可以推后执行来避免作用时间的冲突。在保护时间接近完成时，尤其是当监测时间非常长的时候，一般可采取类似操作。重新调度可以与优先收买相结合，是一种提高网络效率的手段。

4）优先收买：请求的 SON 功能有可能比已部署的 SON 功能具有更高的优先级。这种情况下，协作功能需要中止正在运作的 SON 功能来执行高优先级的请求执行 SON 功能。例如，网络在优化过程中出现了失败恢复的 SON 请求，此时为了保障失败恢复的操作，优化功能将被中止。优先收买经常和重新调度联合使用，在高优先级的功能完成后会重新执行。

5）回退：当先前执行的 SON 功能对于请求执行的功能或其作用效果造成负面影响时，就需要采用回退功能。在这种情况下，协作功能会将功能请求响应和回退绑定在一起。在请求的 SON 功能执行之前需要完成回退操作。当不同的 SON 功能达到相

似效果时，回退便会与功能请求响应绑定使用。例如，下调天线电倾角和降低输出功率都会减小小区范围。根据网络环境上下文，单独的某个功能都是有益的。但是两个功能同时作用时有可能无法达到预期的效果或产生其他副作用，因此需要执行回退功能。

根据具体实施过程中协调功能的能力，还有可能出现其他种类的额外协作判决。例如，当面对两个冲突性的 SON 功能时，可以允许一个而拒绝另一个；也可以同时拒绝两个功能的执行，并触发第三个功能的执行来获取相同的预期效果。另一个解决办法是在协作功能中融入一些调节功能。这些都可以通过改变 SON 功能的行为来实现无冲突的效果。

示范用例：覆盖和容量优化

该示例展示了如何将该 SON 功能的判决逻辑映射到决策树中。

覆盖和容量优化（Coverage and Capacity Optimisation，CCO）是 3GPP 规定（参考 3.2.3 节）的一个重要的 SON 功能，特定小区的 CCO 可以通过两个影响小区性能的 SON 功能来实现：

1）CCO（RET）：改变天线电倾角。

2）CCO（TXP）：改变发射功率。

图 9.19 中给出了一个典型决策树示例，图中展示了收到 CCO（TXP）功能执行请求后的评估状态。如果网络没有共存的 CCO（RET）功能实例的话，TXP 请求会立即得到响应。如果同一个小区中 CCO（RET）功能目前正处于激活状态，那么协作功能便会评估两个功能的请求产生的效果是否一致。TXP 要求增加传输功率，RET 要求上调电倾角。根据评估结果，协作功能会允许执行或拒绝 CCO（TXP）功能。

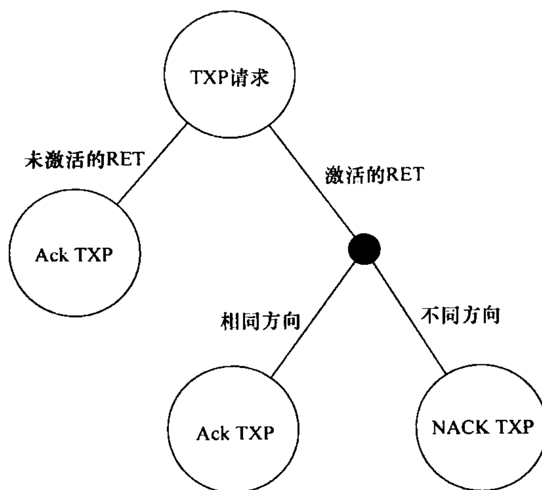


图 9.19　CCO（TXP）协作的决策树

9.2.4　协作方案

根据网络中不同 SON 功能及其之间的冲突和网络的运行目标，需要在 SON 功能

协作中融入不同的需求。

协作方案描述了具体 SON 功能是怎样被协调的，特别重要的是确定了在 SON 功能实例执行过程中的最佳协作判决时机。在接下来的小节中将介绍三种通用的 SON 协作方案及其优势和挑战。这三种方案植根于 SON 功能建立、作用时空等概念上的考虑。这些基本概念已经在前文中介绍了。

下面将会介绍为何某些 SON 功能需要特定的协作方案而另一些 SON 采用不同的方案将会获得更好的效果。

理论上讲，SON 功能可以分为 3 个操作阶段：

1）监测或感知阶段：每个 SON 功能定义一个触发点。如果观测到的参数和测量结果显示需要执行 SON 算法，那么网络将进入监测阶段。监测活动根据用例不同而不同：有可能在预定时间进行连续监测，也有可能按需进行监测。

2）算法执行阶段：在该阶段，生成新配置参数的 SON 算法得以执行。该阶段也有可能包含一些额外的获取数据的步骤。获取的数据可以是测量信息也可以是参数配置，一般用于计算生成新的配置信息。

3）动作执行阶段：该阶段将执行新的配置。这可以通过 SON 功能和目标网元的直接互动实现，也可以通过 SON 功能和网络配置子系统的互动来实现。

协作判决所需要的信息并不是在每个阶段都可以获取的。因此，需要对协作判决的时间点进行仔细选择。

因为各个阶段的过渡时期标示了功能执行的重要阶段，因此此时的协作显得更有意义。理论上，协作也可以发生在监测阶段之前。但是根据冲突的定义（参考表 9.1），在这个时间点进行协作的意义是很值得怀疑的，尤其是考虑到 SON 功能的监测部分往往会持续运行。

图 9.20 将 SON 功能分成了监测阶段、算法执行阶段和动作执行阶段，并显示了在不同阶段过渡期的请求。图中同样显示了不同协作方案（将在下面具体介绍）与 SON 功能的互动时间点。

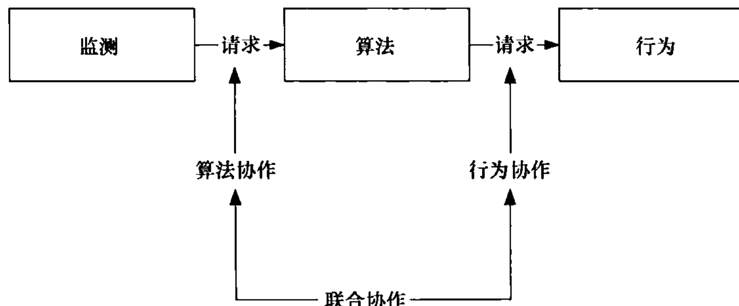


图 9.20 不同协作方案的相互影响点

SON 功能之间可能的相互影响和冲突的分析为 SON 决策树中状态评估提供了信息指示。

9.2.4.1 动作行为协作

由于动作行为的执行体现了最大的潜在冲突，因此协作 SON 功能的最明显方式

是协调动作行为的执行。动作行为可以改变网元配置，因此有利于阻止潜在的冲突。

如果采用动作行为协作，SON 功能在执行之前需要请求协作机制的同意。SON 功能需要向协作机制发送所需要的所有信息，并执行协作机制的反馈指示。只有当协作机制反馈功能响应时，SON 功能才能够执行网络改动。

动作行为协作主要的优势在于可以访问协作算法的所有结果并评估配置的改动。这些改动在行为请求获得响应后就会执行。结合长效的关联时间，这种能力允许协作功能使用当前请求的详细信息和先前应用的配置变化来做出协作判决。这样做可以执行健康检查，突发和后续的反作用配置得以抑制，振荡的行为也可以提前得以检测和避免。

这种能力对某些 SON 功能尤其重要。这些 SON 功能通过改变不同的参数来影响网络的重要属性，如影响小区覆盖范围的 SON 功能。如果在天线下调电倾角后重复地提高发射功率，将会出现振荡重配置的强烈指示。采用动作协作将很容易地检测出这类行为。

由于缩短了 SON 功能激活的时间间隔，因此从效率角度来看，动作行为协作也是很有吸引力的。配合动作行为协作的 SON 功能的作用时间不包括算法执行的时间。

9.2.4.2　算法协作

如果采用动作行为协作，无论 SON 行为请求是否获得批准，其功能的算法部分总会执行。这并不是最佳的操作模式，理由如下：

1）不能低估计算开销：考虑到拒绝执行的行为请求数量，有可能大量的算法执行后都没有任何作用。尤其当算法的结果与协作判决完全无关时更是如此。分析研究表明，当出现大量冲突性的 SON 组合时，是否存在交互作用区域是对协作判决惟一有效的信息。

2）采用动作行为协作将很难保证输入参数的稳健性，而这些输入参数往往会决定算法能否执行或是作为计算新配置的基础参与算法计算。SON 功能需要监测一系列的测量值和 KPI 以决定功能的执行时机。正如前面所述，由于无法完全对 SON 功能进行联合设计以避免冲突，因此需要功能间的协作。改变网络配置的 SON 功能将会对监测这些配置测量值的功能产生影响。一般来说，这种改动不会有立竿见影的效果，而是需要一段时间来体现改动的效果。在冲突性的 SON 功能执行之前，使用实施时间和可见时间来保证这些改动是可观测的。SON 功能有可能需要很长的执行时间。另一个功能的触发过程在此段时间内是很容易超时的，这就意味着这些用于激活算法和用于输入计算的测量值很有可能无法完全反映已实施的网络改动。由于第一个 SON 功能的作用时间已经超时，后续功能请求的错误更改将会执行。因此，如果测量值无法反映目前的网络状态，监测功能不应该触发 SON 功能算法。而单单使用动作行为协作则无法保证类似情况的正确处理。

如果采用算法协作，那么协作功能将在算法执行请求时执行，这样就可以在 SON 算法执行之前采取协作判决。

一个精心挑选的实施和保护时间将会阻止算法的执行，直到监测值可以稳定地反映网络目前状态。在这种操作模式下，在算法执行得到响应后 SON 功能才会被激活。

因此，选择合适的可见时间、实施时间和保护时间是非常重要的。

算法协作的主要缺点在于缺乏协作能力来处理详细的配置更改要求。因此，算法协作无法避免冲突配置和振荡配置的发生。一旦算法执行得以响应，对网络的改动行为也会随之发生。

9.2.4.3 算法协作和动作行为协作的联合

如果同时采用算法协作和动作行为协作，那么这两种方案的优势都能得以体现，但是系统的总体协作复杂度会较高。在SON功能的监测部分和算法部分具备可靠的输入之前，将不会执行SON功能，从而避免对网络进行矛盾性的重配置。

SON协作的主要目的是减少SON功能处理错误输入信息的风险，因此大多数的协作都是采用算法协作。而动作行为的协作仅应用在少量的SON功能中。例如，当多个功能都修改同样的网络参数时，比如说调整天线电倾角和传输功率来完成覆盖和容量的优化。对于一些SON功能来说，自身功能之间也是需要协调的。有可能需要对一个网元多次执行同一个功能操作，但这也要满足一些扩展的要求以完成对配置所有的更改。往往这样的扩展要求，只允许逐步对配置进行更改，但会阻止突发性配置更改和振荡性配置更改。

算法协作部分允许潜在的SON冲突并行执行。接下来就需要依靠动作行为算法处理这些潜在的冲突。值得一提的是，算法协作仍然会阻止错误的输入信息。

联合协作方案的使用也同样适用于决策树。算法或动作行为协作都需要进行单独树的完全遍历。当接收到较充分的请求时，不同于上述操作方式，联合算法需要做一些调整操作。每一个协作功能仍然只有一个决策树，但是树会分成两个部分（见图9.21，一部分用于算法协作，另一部分用于动作行为协作）。

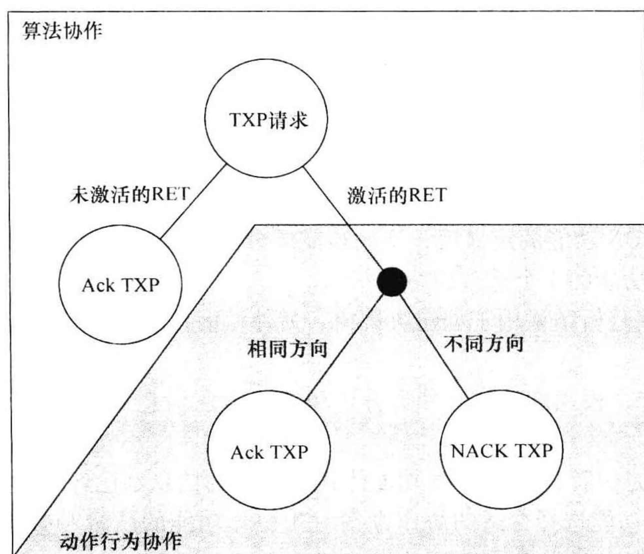


图9.21 算法协作和行为协作分离的决策树

当收到算法执行请求时，上层的决策树开始了操作流程。只有收到动作行为协

作的有效信息时，第二部分才会开始运作。因此，只有当算法协作成功以后，并且协作功能收到动作协作的请求时，该部分才会开始运作。需要注意的是，这种协作机制会进行两次评估（一种方案评估一次）。当设计联合协作方案的协作逻辑算法时，需要注意的是对于这种方案，开始时间和运行时间将会造成更大的影响。SON 功能设计师需要选择足够长的作用时间，从而避免在算法执行时出现 SON 作用时间超时的负面影响。

与单独协作方案（算法或动作行为方案）相比，联合方案的另一个区别是成对的 SON 功能具有更多的相互影响机会。单独的协作方案只会造成一次相互影响，而联合协作方案最多会出现三次相互影响。第一次发生在后触发的功能要求执行算法协作的时候，其余会发生在两个 SON 功能各自要求执行动作行为协作的时候。

本小节讲述了不同的协作方案：算法协作方案、动作行为协作方案和联合协作方案及其各自的优缺点。根据这些信息，我们可以在设计阶段选择设计出最佳的协作方案。下一节将会介绍选择合适协作方案的具体流程。

9.2.4.4　SON 功能协作方案的应用

为实现 SON 功能协作，在设计阶段的最后一步是选择合适的协作方案。

在设计阶段每个 SON 功能都会经历这种相同的流程，如图 9.22 所示：

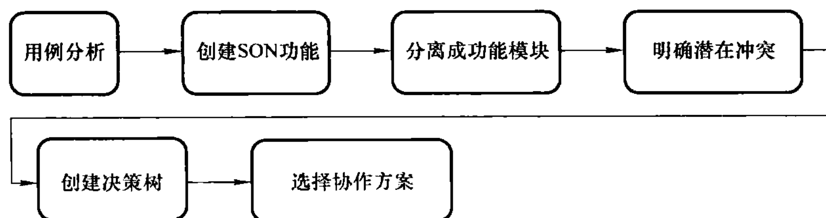


图 9.22　包含功能协作的 SON 功能设计

1）一开始，需要评估 SON 用例，确定触发条件和对目标将会执行的操作。

2）根据用例分析，创建 SON 功能。功能设计者将该功能分离成一些功能模块：监测部分、算法部分和动作部分。

3）完成对 SON 功能的定义后，下一步需要分析和其他 SON 功能的潜在冲突。该步骤需要分别对功能的 3 个部分进行分析。

4）功能冲突分析结果用于创建决策树。另外，潜在冲突性 SON 功能的决策树也需要进行调整。

5）最后一步，根据决策树、冲突分析和功能需求信息来选择协作机制，定义作用时间的组成。

在这些流程完成后，实现 SON 功能协作所需要的信息都已经获得。

为每个 SON 功能选择合适的协作方案对于协作功能的质量和效率都将起到十分重要的作用。协作中需要满足 SON 功能的特殊要求，因此协作的选择依赖于 SON 功能的特性。如果网络中不仅有 A2 冲突的话，那么应该选择算法协作方案。算法协作方案的优势在于可以很好地解决由功能属性引起的冲突。如果 SON 功能间只有 A2 冲

突的话，那么应该采用动作行为协作方案。如果两类冲突都有可能存在（无法判断何种冲突时），则应该选择联合协作方案。

对于不同的 SON 功能可以应用不同的协作方案。两个在一起协作的 SON 功能没必要一定采用相同的协作方案。这种选择也依赖于需要协作解决的冲突类型。例如，两个 SON 功能 A 和 B 需要做协作时，分析表明需要满足以下需求：

1）当功能 B 生效时，功能 A 不一定会触发。

2）功能 B 的行为取决于功能 A 将会改动的配置信息，但是可以与功能 A 并行运行。

由于只有上述的协作要求，因此 SON 功能可以应用不同的协作方案。功能 A 可以采用算法协作方案，当功能 B 运行时 A 将被阻止执行。功能 B 可以采用动作行为协作方案，用于评估之前 SON 功能对配置的更改。

如果在运行中引入了新的 SON 功能，那么有可能需要对现有 SON 功能的协作方案进行改动。这种情况下，为保留目前的协作方案，一般会将算法或动作行为协作方案更改为联合协作方案。联合协作方案补充完善了已经部署的协作方案。

9.2.5 相关的研究工作

SON 功能冲突的问题是显而易见的，业界也提出了不同的功能协作方法来解决此类问题。苏格拉底计划（参考 3.3 节）是一个 EU FP7 的项目，对 SON 功能协作做了大量的研究（SOCRATES，2008 和 SOCRATES，2011）。该项目对潜在的 SON 功能冲突设立了广泛的分类。其中部分分类结果可以与表 9.1 中的分类直接对应；某些分类结果只适用于苏格拉底的系统架构。

基于该分类和 SON 系统架构，该项目提出的协作办法分为两个部分：“头”协作和“尾”协作。其理论概念包含了联合设计和功能协作的思路，但这两种思路都被定义为协作的类型。

1）头协作在设计阶段就消除了潜在的冲突，类似于 SON 的功能联合设计。

2）尾协作在运行时对冲突性的功能进行协作，通过一系列完成不同任务的功能组成了一个完整的协作方案。

除了响应或拒绝功能执行请求，尾协作还可以改动接收到功能执行请求，从而对相同目标的多个执行请求进行协调。

另一个 SON 功能的解决方案详见 Bandh 等人（2011）和 Sanneck 等人（2010）相关研究。其基本思路是根据 SON 功能实例的事件执行环境和运营策略来完成功能间的协作。这种思路假设在设计过程中已经完成了对 SON 功能的分离，因此只研究协作功能，不再考虑 SON 功能的联合设计。9.2.6 节举例介绍了怎样利用该思路体系来完成 CCO SON 功能实例的协作。

9.2.6 SON 功能协作举例

Bandh 等人（2011）相关研究中介绍的实验系统采用的是 9.2.3 小节阐述的 SON 协作思想。使用强大的策略协作机制，该系统可以完成算法协作和动作行为协作。策

略协作系统的优势通过引用、激活、去激活和策略调整，可以轻易地在运行过程中改变行为。每当网络中部署新功能或需要调整现有的算法逻辑时，都可以在运行过程中引入新的协作逻辑，这就是这些特性的优势所在。

使用的系统完全是基于事件的，从而解决了系统在运行时的调整需求。事件可以传输所有的状态请求和回复。协作请求时间通过触发评估网络上下文策略来实现协作判决。为了展示协作功能的效率，现假设在覆盖和容量优化的示例中，小区簇中有两个覆盖漏洞，同时有两个已激活的SON功能。覆盖和容量优化（参考5.4节）旨在较好地平衡负载容量和全网覆盖关系。该目标需要通过两个SON功能实例CCO（RET）和CCO（TXP）的协作实现：将决策树提供的判决逻辑映射到一系列策略上，每个功能均采用联合设计方案。

为了体现功能协作的优势，在网络布局中将采用单一事件跟踪（事件跟踪会在两次运行之间进行复位）。第一次运行时不采用SON功能协作，第二次运行时采用SON功能协作。在没有功能协作时，所有的SON执行请求都会得到响应，各个SON功能都将直接执行。结果表明CCO的预期目标没有实现。图9.23显示结果表明小区大小仍然不平衡，小区覆盖漏洞依然存在。

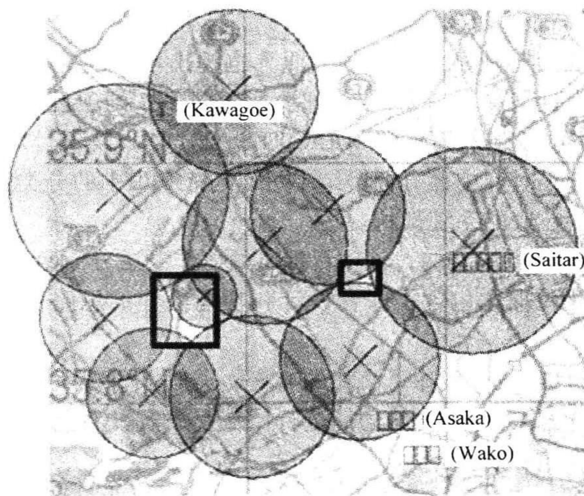


图9.23　无协作示例：存在覆盖漏洞的不平衡的小区分布
（Bandh等人，2011，经2011 IEEE许可转载）

第二次运行时采用了SON功能协作。与第一次的执行请求全部获得响应不同，此次运行拒绝了一个请求，回退了两个之前对网络的改动。表9.2显示了根据所使用的事件序列和协作功能做出的协作判决。第一列是CCO（RET）和CCO（TXP）的事件序列，第二列是相关联的小区，第三列显示了对SON功能执行请求的协作判决。在回退操作中箭头指示了回退的目标；在拒绝操作中，箭头指示了拒绝的原因。

在完成所有功能之后可以获得平衡的小区分布并达到全覆盖效果。先前所有的覆盖漏洞都消失了（见图9.24）。

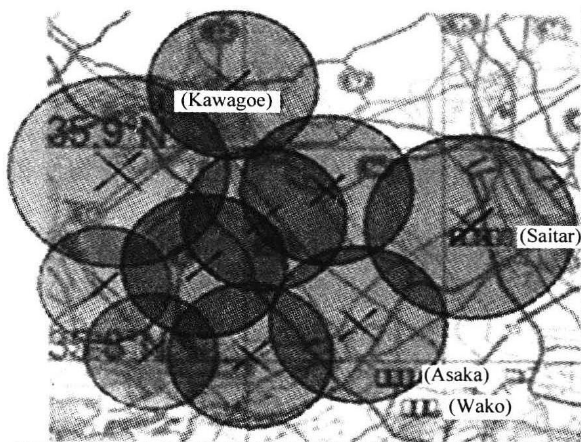


图9.24 协作示例：全覆盖和平衡的小区分布
（Bandh等人，2011，经2011 IEEE许可转载）

这个示例展示了SON功能协作的优势。在设计阶段，使用与解决方案无关的决策树推导出特定的SON功能协作逻辑，然后将其映射到具体的协作功能中并进行操作。网络操作者可以通过对决策树进行操作预设来影响协作功能的具体行为。例如，在不同的时间和不同的网络场景下执行特定的上下文行为。

在设计阶段，对SON功能的分析过程将会确定功能的协作要求。在功能分析完成后有可能会确定应采用何种方式来进行功能协作。此时，不一定能够充分了解到另一个SON功能的运作或者网络前期的改动。在示例中采用的联合协作方案（包括算法协作和动作行为协作），使得协作功能检测到先前执行的功能没有达到预期效果，因此将先前执行的功能回退两次，从而保证另一个功能达到目标效果。

网络操作者通过创建特定的SON功能决策树来实现对预期协作行为的管控，这样判决的指导原则就会在运行中自动实施，这些协作判决往往比简单的响应或拒绝更加复杂。结合动作行为协作，协作功能可以识别出先前执行的功能没有达到预期效果，因此需要执行回退操作以保证其他更合适的功能运行，解决网络问题。

表9.2 事件序列和协作决策（Bandh等人，2011，经2011 IEEE许可调整）

改变	小区	协作判决
RET	18	ACK
RET	17	ACK
RET	16	ACK
TXP	20	ACK
TXP	23	ACK
TXP	25	ACK
TXP	16	NACK
TXP	17	ACK，回退
TXP	19	ACK
TXP	18	ACK，回退

9.3 小结

本章的主要内容是SON功能之间的相互影响，尤其是要阐述网络中同时运行的SON功能之间的冲突情况。本章重点介绍了SON功能冲突情形和处理方式这两方面的内容。

9.1节总体介绍了SON功能间的相互影响，详细阐述了功能间的冲突情形，包括相互影响何时将会转化为冲突、冲突将会对另一个功能实例造成怎样的影响等。把已知的冲突进行归类，这样做有利于寻找冲突的处理方法。

值得注意的是不仅同时运行的SON功能之间有可能出现冲突，两个给定的SON功能间的依赖链和功能执行链也可能造成冲突性行为。

为了使读者对SON功能冲突有一个清晰的理解，除了讨论冲突原因外，本书特意引入了NGMN论坛的SON功能示例进行细致分析。

在引入SON功能冲突之后，9.2节介绍了几种可以保证网络高效、可靠运作的冲突处理方式。

接下来对SON功能的联合设计和协作方式进行了讨论。由于联合设计有助于减少SON功能个体之间的依赖性，因此在介绍SON功能的协作时，将联合设计作为一种保障网络稳定运行的重要手段进行了讨论。细致的SON功能设计有助于减少冲突个数，减轻协作判决的工作量。

9.2节描述了功能协作的预期目标，总体介绍了功能协作的基本思路。这种思路植根于基本的SON功能特性，不预设任何具体的技术解决方案。通过这种方式，可以清晰地理解设计人员是怎样通过对SON功能的分析得到功能协作的逻辑算法。除了低层次的功能协作外，上述思路使得网络操作者无需紧密进行系统操作，就可以完全掌控网络行为。通过对SON功能和基本的协作逻辑进行分析，可以推导出具体的协作方案及其优缺点。

最后，举例说明怎样将理论上的SON功能协作应用到现存的SON功能当中。根据SON功能分析推导出协作要求，进而完成对协作方案的选择。该示例根据系统内SON功能执行请求的具体序列，分别给出了进行SON协作和不进行SON协作时的优化结果。

通过第9章可以看出，网络内同时运行的独立的冲突性SON功能会带来潜在危险。同时也可以看到，这些危险可以通过设计阶段的详细功能分析得以处理，从而在运行时获得一个增强的功能和平衡的协作效果。一个恰到好处的功能协作可以阻止功能冲突，可以避免反向重配置和振荡重配置带来的服务质量下降，同时也有利于高水平执行并行的SON功能，从而提高总体网络效率。当作用区域不同时，协作功能将会允许实施并行的SON功能。这非常有助于整体网络运行效率的提高。

参考文献

Baliosian, J., Sailhan, F., Devitt, A. and Bosneag, A.N. (2006) The omega architecture: towards adaptable, self-managed networks. Proceedings of the 1st Annual Workshop on Distributed Autonomous Network Management Systems, June, Dublin, Ireland.

Bandh, T., Romeikat, R., Sanneck, H. and Tang, H. (2011) Policy-based coordination and management of Self-Organising-Network (SON) Functions. IFIP/IEEE Symposium on Integrated Management, May, Dublin, Ireland.

Bandh, T., Sanneck, H. and Romeikat, R. (2011) An experimental system for SON function coordination. IEEE International Workshop on Self-Organising Networks, May, Budapest, Hungary.

Barth, U. and Kuehn, E. (2010) Self-Organisation in 4G mobile networks: motivation and vision. 7th International Symposium on Wireless Communication Systems, September, York, UK.

Calder, M., Kolberg, M., Magill, E.H. and Reiff-Marganiec, S. (2002) Feature interaction; a critical review and considered forecast. *Computer Networks*, **41**, 115–141.

Cleaveland, R. and Smolka, S. (1996) Strategic directions in concurrency research. *ACM Computing Surveys*, **28**(4), 607.

Doettling, M. and Viering, I. (2009) Challenges in mobile network operation: Towards self optimising networks. Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, April.

Laiho, J., Wacker, A. and Novasad, T. (2006) *Radio Network Planning and Optimization for UMTS*, 2nd edn, John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, pp. 505–569.

Sanneck, H., Schmelz, C., Bandh, T. *et al.* (2010) Policy-driven workflows for mobile network management automation. 6th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, June, Caen, France.

Schmelz, C., Amirijoo, M., Eisenblaetter, A. *et al.* (2011) A coordination framework for self-organisation in LTE networks. IFIP/IEEE Symposium on Integrated Management, May, Dublin, Ireland.

SOCRATES (2008) Use Cases for Self-Organising Networks Deliverable D2.1, INFSO-ICT-216284 SOCRATES, March. Available at http://www.fp7-socrates.eu/, [accessed 30 August 2011].

SOCRATES (2011) Final Report on Self-Organisation and its Implications in Wireless Access Networks. Deliverable D5.9, INFSO-ICT-216284 SOCRATES, January. Available at http://www.fp7-socrates.eu/, [accessed 30 August 2011].

Strassner, J., Agoulmine, N. and Lehtitet, E. (2006) FOCALE – A novel autonomic networking architecture. Latin American Autonomic Computing Symposium (LAACS), Campo Grande, MS, Brazil.

第 10 章　异构自组织网络（HetNet）

Cinzia Sartori、Henning Sanneck、Klaus Pedersen、Johanna Pekonen 和 Ingo Viering

10.1　背景介绍

如第 2 章所述，移动运营商认为 HetNet 是一种应对快速增长的数据业务的潜在解决方案。

实际上，从 HSPA 到 LTE 的演进带来了频谱效率的提升，然而单纯的频谱效率提升并不能满足业界预测的业务增长需求。这意味着仍然需要其他提升性能的关键技术，如宏小区裂变、增强型接收器、高阶扇区化和增加热点小区。由于 LTE 的每链路频谱效率已接近理论上的香农极限，增加微型小区被认为是提升单位面积频谱效率的最有前景的解决方案之一。因此，从只有单一宏小区的网络到包含多层网络拓扑的异构网络（即 HetNet，见图 10.1）的演进，值得进一步研究。本章主要关注于 LTE 系统中的多层网络，并列出了一些更加方便、快捷地开展多层网络部署及运行的关键技术。特别地，本书尤其关注表 10.1 中总结的不同 LTE 类型小区联合部署的场景。值得注意的是，表 10.1 列出的主要特性只是作为一个参考示例，因为供应商可自由地根据表中列出的其他功率设置和天线增益等指标来开发不同类型小区中的网络设备。在表 10.1 中，需要指出的是，等价等方性辐射功率（EIRP）存在较大区别。而这意味着不同类型小区的覆盖范围以及对周围小区产生的干扰均大不相同。

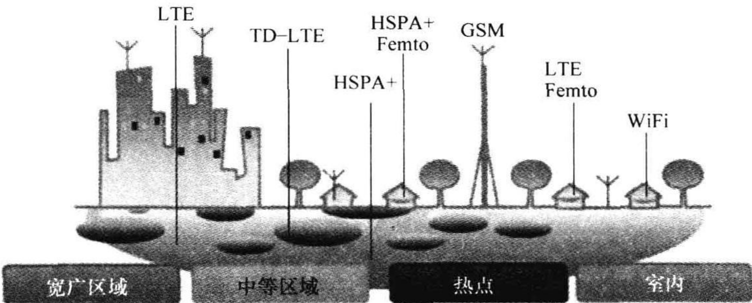


图 10.1　多接入和多层网络

表 10.1　10MHz 带宽下不同的 LTE 小区类型对应的主要特性实例

小区类型	发射功率	天线增益	EIRP	覆盖范围
宏小区	46～49dBm	14dBi	60～63dBm	>100m
微小区	37～40dBm	5dBi	42～45dBm	100m
微微小区	24～37dBm	4dBi	28～41dBm	20～50m
HeNB	10～20dBm	0dBi	10～20dBm	10～20m

宏小区、微小区和微微小区有相同的架构，HeNB 则有不同的架构，详细的对比和介绍将在 10.2 节展开。此外，宏小区基站通常由运营商经过精细的无线网络规划后进行建设，微微小区则可以在无需进行完整的无线网络预先规划的情况下以自组织（ad hoc）的方式由运营商进行部署。极为不同的是，HeNB 的安装是由本身并非是技术专家的终端用户完成的，这就决定了 HeNB 的位置及其开关时间均是根据终端用户的需求而定。因此，HeNB 是运营商非直接控制下以一种无序的方式进行部署。此外，HeNB 能够以接入受限的配置进行部署，这带来了极有挑战的干扰场景，需要灵活的干扰管理方案。

对于 LTE 多层部署来说，一个重要的前提是微型基站（如微微小区基站、HeNB）是自配置、自优化的，这是因为，当进行大量微型基站部署时，由人工进行基站配置和性能管理几乎是不可能的。10.2 节首先对 HeNB 主要的性能进行概述，以进一步进行场景分类及定义这种特殊的微型小区类型。10.3 节列出了和 LTE 多层部署相关的主要自配置技术，10.4 节和 10.5 节解决的是针对 LTE 多层部署的自优化关键技术，如干扰管理、移动性优化和负载均衡。所有以上提到的技术都是成功和高效进行 LTE 多层部署及运行的关键因素。

第 4 章、第 5 章已经对 LTE 中继节点、多接入技术和节能的 SON 技术进行了相应的描述，故本章不再提及。

10.2　标准化情况及网络架构

LTE 3GPP 标准从第一次 LTE 版本（即 3GPP R 8）就已经提到了异构网络部署场景。例如，E－UTRAN 基站类别规范（3GPP TS36.104，2011）在宏基站基础上定义了微微基站和 HeNB。此外，也引入了和 HeNB 子系统相关的封闭用户集（CSG）概念（参见 2.1.8.5 节）。

微微基站可以简单地描述为小型的宏蜂窝基站（在 10MHz 带宽下，宏基站典型的下行发射功率是 36 dBm，微微基站的为 24 dBm）。微微基站与宏基站具有相同的网络架构，如 X2 接口可在宏基站和微微基站间以及微微基站之间使用，然而 HeNB 却完全不是这样，即 HeNB 与宏基站间并不存在接口。在 Femto 论坛（http://www.femtoforum.org）的需求指引下，3GPP 制定了 HeNB 相关的标准规范。

下一代移动网络联盟（Next Generation Mobile Networks，NGMN）也在 2010 年 NGMN 自组织网络会议上对 HeNB 和宏基站交互的多层场景提出了要求。特别地，NGMN 提到了宏基站和 HeNB 间的干扰管理。

最初针对 3GPP 宏小区环境提出的 3GPP 自组织网络特性也适应于微基站和微微基站。但是，HeNB 需要支持自治管理流程，不需要和处于相同异构环境下的相邻宏基站、微基站和微微基站进行信令交互。图 10.2 概况了从 R8 到 R10 与 HeNB 相关的 3GPP 标准化主题，接下来将会进行详细的介绍。

1. 3GPP R8

3GPP R8 定义了 HeNB 的基础架构和封闭接入模式的概念（只允许 CSG 用户得到

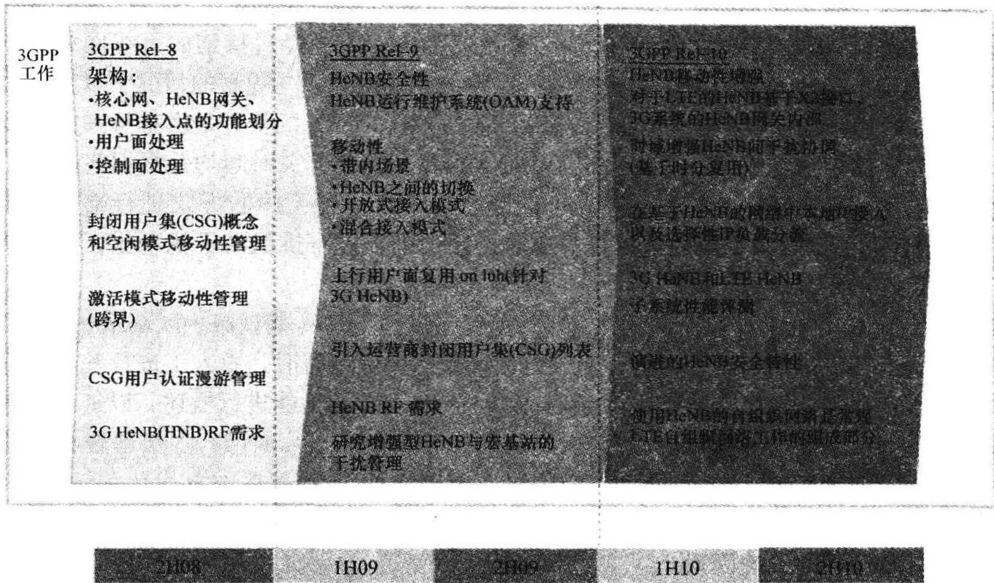


图 10.2　HeNB 3GPP 标准化

服务，详见 2.1.8.5 节），该版本尤其关注于用户住宅区域中异构网络部署所需功能。在该版本中，为了支持以非协作方式部署的 HeNB 的自配置功能，引入了专门针对 HeNB 的功能，如网络监听模式（Network Listening Mode，NLM，主要用于获取周围网络环境信息，可参见 10.3.2 节）及自治 HeNB 功率校准。基于 3GPP R8 的定义，LTE 终端（即被允许接入到 CSG 小区）支持 CSG 特定的规则和功能，因此为了解决与传统终端的兼容问题，R8 定义了 CSG 小区中异构网络场景下空闲模式移动性管理方法和流程。

在激活模式下的移动性管理中（切换），从 HeNB 到宏小区的切换与宏小区层面上的移动性管理方法相同。在用户住宅场景中，当用户从室内的 HeNB 移动到室外宏小区时，为保持语音或数据连接的连续性，R8 将对跨界移动性的支持作为一个必需的功能选项。另外，从 3GPP R8 开始，就已经支持漫游场景下的 CSG 订阅。

2. 3GPP R9

3GPP R9 介绍了宏基站场景的自动优化用例和支持流程。这些流程也适应于拥有宏小区、微小区或者存在 X2 接口的微小区间的异构网络部署。宏基站—HeNB 间的干扰管理已在 3GPP 建立了专门的研究课题进行探讨，其中 FDD 模式（3GPP TR36.922，2011）及 TDD 模式（3GPP TR36.922，2011）下的相关标准规范工作将在 3GPP R10 中进行。

3GPP R9 进一步增加了 HeNB 子系统操作和 CSG 相关的定义，包括 OAM 系统（基于 Broadband Forum 论坛的提议，如 BBF TR－069，2010 和 BBF TR－196，2011）、HeNB 安全性架构和要求。

异构网络的一个关键性能特征是对切换的支持。3GPP R9 中也介绍了激活模式下

带内移动性（从宏小区/微小区/微微小区基站到非协作 HeNB）。在典型场景中，HeNB 处于宏小区的覆盖范围内，由于 HeNB 数目较多，需要重复使用物理小区标识（Physical Cell Identity，PCI），当用户终端上报邻区测量结果时，服务宏小区将会出现 PCI 混淆的现象。因此，服务宏小区需要被测量的 HeNB 小区提供额外的小区身份，从而为切换请求选择正确的目标小区。HeNB 定义了两种新的接入模式：开放式接入模式，允许所有的用户使用 HeNB（即对于用户来说，HeNB 和其他普通小区并无差别）；混合接入模式，仍允许所有的用户使用 HeNB，但是 CSG 用户拥有较高的优先级。

3. 3GPP R10

3GPP R10 进一步增加了新的功能选项，尤其是提出了企业和公共环境下的异构网络构建。3GPP R10 所增加的功能选项包括 HeNB 间移动性优化增强（由 X2 接口相连）、HeNB 的本地 IP 接入（Local IP Access，LIPA）以及以增强型小区间干扰协调为特征的干扰管理方法（见 10.4 节）。

对于宏小区，HeNB 解决方案的规范保证了其可以工作在实际的多供应商环境下，网元间有开放的接口，可以和其他 3GPP 蜂窝网络完全融合。与 LTE HeNB 的规范类似，3G HeNB 也定义了相应的标准化概念。

3GPP TS36.300（2011）定义了 LTE HeNB 子系统的功能划分以及 CSG 移动性原则，3G HeNB 子系统第二阶段的特性在 3GPP TS25.467（2011）中进行了描述。

10.2.1　异构网络的网络架构

图 10.3 展示了一个完整的多接入技术异构网的网络架构，其中包括 3G 和 LTE 宏基站、HeNB 以及 LTE 中继节点。

10.2.1.1　HeNB 部署场景

3GPP R8 中定义的 LTE HeNB 子系统架构有 3 种不同的部署场景：

1）HeNB 和增强型分组核心网（EPC）通过 S1 接口直接相连：HeNB 像宏基站那样连接到 EPC，并可以和多个 MME/ SGW 通过 S1 连接。

2）HeNB 通过 HeNB 服务网关（HeNB GW）连接到 EPC：HeNB GW 在多个 HeNB 的情况下担当控制平面的集中控制节点，可以终止流向 HeNB 和服务网关的用户平面数据。对于 MME 来说，在 S1 接口建立过程中，HeNB GW 可看成拥有多个小区的 eNB，对于 HeNB 来说，HeNB GW 可看成 MME。

3）HeNB 通过 HeNB GW 仅和 EPC 建立控制平面连接。

HeNB 有一些特殊的功能（如寻呼优化），该功能是 HeNB GW 的一部分，因此在没有 HeNB GW 的场景下，这些功能由 MME 提供。

从 3GPP R8 开始，LTE 规范就已经支持 CSG 概念，因此在所有场景中，MME 可进行 CSG 的接入控制。支持本地 IP 接入的 HeNB 子系统要求把本地网关的功能集成到 HeNB 中，具体描述详见 3GPP TS36.300（2011）。HeNB 也要支持连接到 EPC 的 S5 接口。

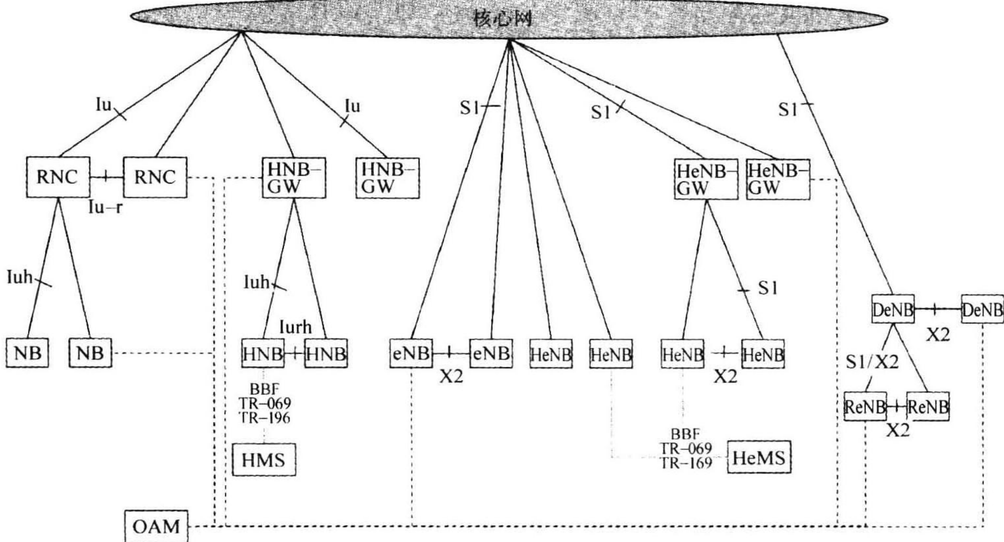


图 10.3 多接入技术异构网的网络架构

10.2.1.2 住宅及企业场景

异构网络中，企业场景与住宅场景对 HeNB 的性能要求存在差异：

1）住宅 HeNB 多工作在封闭或者混合接入模式，也有少数工作在开放接入模式。通过 S1 接口完成向宏小区层面的切换，尚未涉及 HeNB 间的移动性。

2）企业 HeNB 需要支持和宏层面间的切换（带内和带外）以及相邻 HeNB 间的切换。对于 HeNB 间的移动性管理，提出了经由 X2 连接的切换流程，以减少企业内部切换对 MME 带来的信令负载。企业 HeNB 工作在混合或开放接入模式来保证对访客的覆盖，但是也可选择封闭接入模式。

10.2.1.3 3G HeNB 子系统

在 3G HeNB（HNB）子系统中，由于传统网络系统及终端的存在，需要研究特别的解决方案以应对 3G HeNB 子系统中的 CSG 注册控制问题。因此，3G HeNB 网关（HNB GW）有一些特殊的性能，这些性能是 LTE HeNB 网关（HeNB GW）所没有的。3G HeNB 子系统与 LTE HeNB 子系统的主要区别如下：

1）HNB GW 是 HNB 子系统中的必需网元。

2）为支持已有终端，HNB GW 需支持 CSG 接入控制相关的功能。

3）支持用户平面的电路交换。

4）HNB 和 HNB GW 间基于 Iu 的接口传输一些 HNB 特定的扩展信息和传统用户终端在 HNB GW 的注册信息。

10.3 自配置

对于微型小区来说，自动配置是一个关键性能要求。新加入的基站必须以最少的

人为干预把自己融合到网络中：基站需要使用有效的安全证书进行配置引导，并连接到网络，以获取合适的软件和参数。无线参数的获取称为“动态无线配置（Dynamic Radio Configuration，DRC，见 4.2 节)”，包括邻小区列表、切换配置、导频功率设定等参数。除了增加新基站的参数外，原有基站的参数也要更新。

10.3.1 自动连接建立和自动接入授权

一旦进入网络并开启电源，任何新基站必须能够以一种安全的方式连接到运行维护系统 OAM 以获得网络网元相关及位置相关配置参数（见 4.1 节)。异构网络的要求更甚于宏小区网络，异构网络节点需要在运行前根据定制需求进行配置，而非在工厂中就预制好相关的定制需求。对于自动连接和自动授权，要在之前的网络规划阶段考虑逐步完成相关的配置参数管理及预制。在实际的接入授权阶段，预制的静态配置数据集将会下载到基站节点。与宏小区网络是预先规划的方式不同，HeNB 节点以一种非协作的方式部署，因此很明显，这里提到的 HeNB 和常规基站间的依赖性是非常低的（如在校准频带上，eNB 和 HeNB 需要分别操作)。自动连接、自动接入授权过程在内容（如节点的 SW 版本）和执行时间上是互相独立的。

HeNB 和 eNB 有各自的自动配置架构（见图 10.4)：HeNB 网络有一个标准化的 Itf－S 接口（3GPP‘Type 1’OAM 接口)，该接口基于 Broadband 论坛 TR－069 标准化家族（BBF TR－069，2010)；但是对于 eNB 来说，Itf－S 接口中只有自动连接过程中安全性相关的部分进行了标准化（见 4.1 节)。

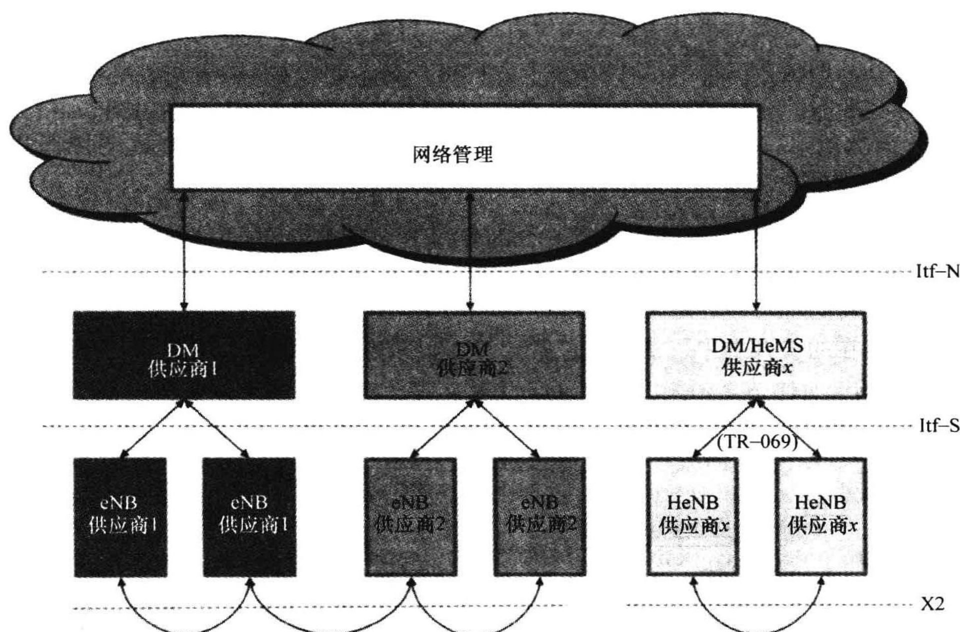


图 10.4 多供应商场景下的 LTE 网络架构

自动配置过程可以通过 Itf－N 接口（3GPP‘Type 2’OAM 接口）由 eNB 和

HeNB 联合控制。这要求 HeNB 和 eNB 连接到一个公共的网络管理系统，并执行自动配置管理（见 4.1.2 节）的功能。

动态无线配置主要包含物理小区 ID（PCI）分配、跟踪区（TA）编码和邻区设定等操作。对于 HeNB/eNB 交互的网络系统，固定参数可以在规划阶段（进行同信道部署）预先配置给每一个域，但是 PCI 和 TA 在域中是动态分配的。在 X2 接口可用的情况下，域间相邻关系可以通过自动邻居关系（Automatic Neighbour Relationship，ANR）的操作进行建立。

10.3.2　自动站点识别及硬件到站点的映射

4.1.2 节解释了如何将基站映射到网络规划中所指定的站点，并描述了从人工交互到全自动站点识别的一系列相关机制。在异构场景下，人工机制不再适用，只能采用如下相关方案：

1）基于卫星的定位（如采用 GPS）：此方法在具有较大站间距的宏小区场景下可靠性极高。然而，在异构场景下此方案的定位不再精确，从而可能引发潜在的模糊站点鉴定问题（与整体站点密度高、很多站点的不同 RAT 或无线层设备具有共址特征有关）。对室内应用来说，由于卫星信号无法接收或低质量接收，基于卫星的定位方法几乎不再适用。

2）基于无线网络的定位/识别：

① 通过现有无线网络（如可用的宏网）的基于位置的可用服务可以用于 HeNB 的定位，其精确度无疑将低于卫星定位方法；

② HeNB 网络监听模式（Network Listening Mode，NLM）：在此情况下，HeNB 首先切换为监听模式，从而能够获得邻近小区的粗略信息。

3）射频识别（Radio Frequency IDentification，RFID）标签：RFID 在阅读器和通过无线电波附着在目标之上的电子标签之间传输数据。如果站点准备过程（提供回传连接和功率）可以采用 RFID 标签标志一个站点，当网元具有内嵌或者临时附着的 RFID 阅读器时，就可以获得这一信息。这是一种尤其适应于室内部署的方法，因为此场景下只需实现信号的近距离接收，从 LAN 连接和功率的角度来讲，这些站点可被定义为潜在的“开发中”的合适位置。一个新部署的网元可以向 OAM 系统（详见图 10.5）发送所述站点相关信息及其硬件 ID。服务器会向网元回复所需接纳控制信息，如列表更新、软件下载等。

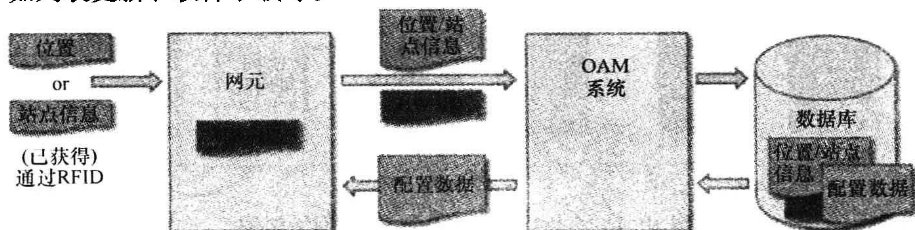


图 10.5　自动站点识别和硬件到站点的映射

异构网络中站点识别的重要挑战之一是如何在密集部署情况下避免识别模糊问题。Bandh 和 Sanneck（2011）的研究提出通过利用 OAM 系统中所有可用的相关信息来扩展上述方法，这些信息可以通过网元由现网获取。站点相关功能（如 RAT、小区类型、频率/扇区配置）可以用于评估实际的网元硬件清单。站点状态（是否已经安装）可用于从已建立的潜在站点集中移除该站点。此外（在实际硬件可支持的范围内），可以考虑在天线和与其连接的辅助设备方面网元所需要获得的信息。

10.3.3　自动邻区关系建立

自动邻区关系（Automatic Neighbour Relations，ANR）具有网络邻居节点间无需进行太多交互的特征。部分功能置于终端，因此不会受到网络结构的影响。如 4.2.3 节所述，连接到给定小区（小区 A）的用户对一个未知的邻小区（小区 B）进行测量。在相同 LTE 频段上，终端将持续不断地进行上述操作。在频段之外（频段之间或者 RAT 之间），服务小区需要对用户的频段间测量进行配置。一旦接收到未知的（来自小区 B 的）PCI，小区 A 指示终端测量并上报小区 B 的 E-UTRAN 通用小区 ID（E-UTRAN Global Cell ID，EGCI）。作为一种替代策略，类似的信息也可以通过域名管理提供，但是当涉及的小区属于不同网域时（如小区 A 属于某个宏基站而小区 B 属于某个 HeNB），此方法不再适用。一旦邻小区被识别出，X2 接口将在 MME 的支持下自动建立。

邻小区的检测和上报已授权给用户执行，因此基于用户的 ANR 功能在异构场景下也适用。惟一的例外在传输部分，也即在（宏基站和 HeNB 间的）X2 接口不可用的场景下必不会发生的 X2 接口自动建立过程。

10.4　自优化：干扰管理

10.4.1　异构场景下的干扰特性

当网络从只有单一的宏小区演变为拥有不同类型基站的异构场景时，总的干扰同样也发生了重大变化。例如，在只有宏小区的网络中，干扰管理的第一步通常是在安装新站点前进行网络规划。网络规划通过合理的站点选址、采用有效的扇区化以及优化天线倾角等技术，是保证相邻站点间不会造成太大互干扰的一种有效手段。但是，当演变到异构场景时，不可能通过初始无线网络规划和站点选址来达到相同的干扰赋形水平。虽然如微微基站那样的微型小区也是由运营商负责安装的，但在无线网规划中的站点选址中并未达到宏站情形下的精细度。另外，私有 HeNB 是以非协作方式安装的，运营商无法控制其位置。HeNB 可能会被用户安装在离运营商的微微基站很近的地方、不同用户安装的多个 HeNB 也可能有非常近的站间距离等。HeNB 的非协作部署常常造成混乱的干扰场景，这就需要自动自适应干扰管理技术来保证所有用户对整体系统性能的满意度。异构场景下遭受的下行和上行干扰水平与只有宏小区的场景相比具有很大的不同，主干扰比例（Dominant Interference Raito，DIR）也更为明显。

DIR 表示最强干扰与其他干扰总和的比率，因此与只有宏基站的情景相比，异构场景的高 DIR 是干扰抑制技术的应用所带来的潜在高增益的指标之一，所述干扰抑制技术如避免主干扰、采用小区间干扰协调（ICIC）技术和（或）采用能够抑制或消除主干扰的高级接收器等。

本章关注异构场景下的 ICIC 技术。10.4.2 节首先概述功率域和频域的干扰管理技术，10.4.3 节将详细描述 3GPP R10 的时域增强 ICIC（eICIC）技术，最后将对 3GPP R11 中异构场景下 ICIC 技术的创新性解决方案给出相应观点。

10.4.2　基本的干扰管理技术

本节概述当前 LTE 版本中所采用的基本干扰管理技术，通过对用于不同基站类型的合理载波部署选择方案以及功率控制技术的可用自由度的有效利用来实现。虽然下面所述技术将多以 LTE 为例进行概述，但在很多情况下也同样适用于 3G/HSPA。为增加容量、提高覆盖范围，在宏小区环境中可增加 HeNB 或者微微基站，下面的基础技术即以这两种不同的场景为例进行说明。

10.4.2.1　宏基站和 HeNB 的共存场景

图 10.6 说明了宏基站和 HeNB 同信道部署时的下行干扰场景。本书中，同信道部署是指两种类型的基站部署在同一载频和频带上的情景。当 HeNB 配置为封闭用户集（CSG）时，只有一部分拥有匹配的 CSG ID 的专属终端允许得到服务，这是最有挑战性的干扰场景。假定图 10.6 中的 HeNB 小区#2 是一个 CSG，处于宏小区边缘的用户虽然离 HeNB 小区#2 很近，但却一直由宏小区提供服务。仅当用户拥有匹配的 CSG ID 时才被允许接入到 HeNB 小区#2。这也意味着邻近 HeNB 但不允许接入的宏小区用户将会受到 HeNB 的强干扰，从而导致高的 DIR。宏小区用户在 HeNB 覆盖范围内却不允许接入，会受到非常高的干扰，因此高 DIR 也经常说成带来了宏层面的覆盖漏洞。第二种下行干扰场景是指 HeNB 小区#1 邻近宏小区。这种情况下，宏小区作为干扰源，对 HeNB 小区#1 的用户带来潜在的强干扰。但是，此情景相对由 CSG HeNB 引起的宏层面覆盖漏洞并不严重。

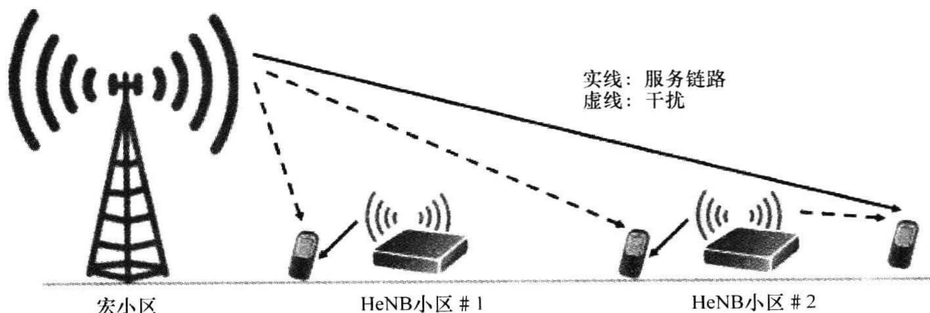


图 10.6　宏基站和 HeNB 同信道部署时的下行干扰场景

相应的上行干扰路径如图 10.7 所示，可以看到此处的情况恰恰相反，邻近 HeNB 小区#2 边缘的宏用户从下行中的受害者变成了上行中的干扰源。由于主动采用

了部分路损补偿的上行用户功率控制策略，远离服务小区的宏网用户会采用相对较高的发射功率，从而对邻近的 HeNB 带来较强干扰。但是，在绝大多数场景下，宏网用户只在一个可用频段子集中进行调度，这意味着 HeNB 小区#2 仍然有未受邻近宏用户严重干扰的可分配带宽。HeNB 小区#1 调度的用户对宏小区造成的干扰是需要注意的第二种上行干扰场景。HeNB 用户对宏小区造成的上行干扰需要谨慎控制以避免降低上行宏小区性能甚至减小上行宏小区覆盖范围等有害影响。然而，由于 HeNB 用户与对应服务小区间的路径损耗较小，其发射功率相比宏网用户较低，这种情况下，3GPP 标准化的上行功率控制可带来增益。

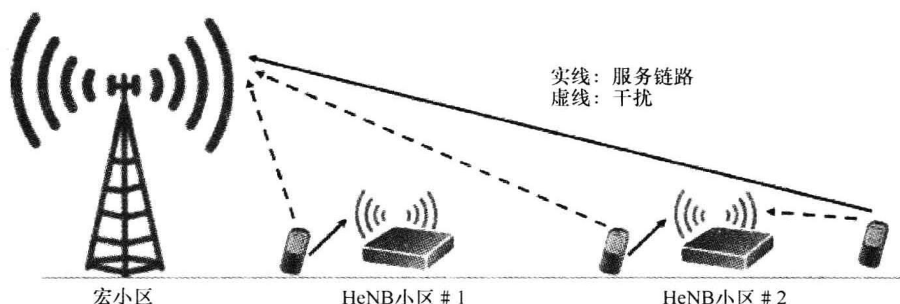


图 10.7　宏基站和 HeNB 同信道部署时的上行干扰场景

10.4.2.2　功率域解决方案

采用自治 HeNB 功率校准方案是减少 HeNB 对宏网用户的干扰所造成影响的最简单方法之一。这是一种 HeNB 为最小化对宏网用户的干扰而降低发射功率的同时，确保 HeNB 用户性能的技术。自治 HeNB 功率校准常基于采用 NLM 的本地感知技术，NLM 基于内置的用户接收功能测量来自其他同信道部署的宏基站/HeNB 的接收信号。最常用的自治 HeNB 功率校准方法基于对最强的宏网同信道干扰强度的测量，通过测量结果的线性函数进行 HeNB 发射功率的调整。因此，HeNB 处于宏小区边缘时的发射功率要低于其处于邻近宏基站处的情况。通过采用这些技术，HeNB 可调整发射功率、避免高于本地宏小区信号。以用户测量值、其他测量值的收集以及网络性能统计等为基础的 HeNB 传输功率微调机制可作为自治 HeNB 功率校准解决方案的辅助手段。自治 HeNB 功率校准方法从而也可能包括属于 SON 优化的额外的配置参数，基于诸如来自宏网络和家庭网络的整体网络 KPI。

需要注意的是，假定基于参考信号接收功率（Received Signal Reference Power，RSRP）或者参考信号接收性能（Reference Signal Received Quality，RSRQ）等下行测量值选择服务小区，则下行 HeNB 发射功率的调整也会影响 HeNB 的覆盖范围。因此，如果降低 HeNB 的发射功率，其服务区域也会相应减小。这意味着相比 HeNB 全功率发射的情景，连接到 HeNB 的用户与 HeNB 之间的路径损耗一般较小。采用自治 HeNB 功率校准后，由于上行用户部分路损补偿的功率控制机制，全功率发射的影响会转化为较低的 HeNB 用户发射功率。因此，自治 HeNB 功率校准也会在 HeNB 小区对宏小区的上行干扰方面产生积极的影响。另外，对于由宏基站和 HeNB 服务的用

户，建议分别使用不同的上行用户功率控制参数。由此，当在宏小区网络中同信道部署 HeNB 时需要增加参数优化的维度。

10.4.2.3　频域资源划分

自治 HeNB 功率校准虽然是非接入 CSG HeNB 场景下减少宏层面覆盖空洞的潜在解决方案，但是该方案不能完全消除覆盖空洞带来的风险。因此，为确保不会因非接入 CSG HeNB 引发的宏网层面的覆盖空洞，需要划分宏基站和 HeNB 间的资源，通过这样的方法，一些宏网的资源就能避免来自 HeNB 的干扰。

因此，通过给 HeNB 分配一个可用载波集合，从而实现频率资源的划分。通过这种方式，至少宏小区使用的部分载波将不受 HeNB 的干扰。那些不受 HeNB 干扰影响的宏小区载波被称为“逃逸载波”（Escape Carrier），当宏小区用户接近封闭接入模式的 HeNB 附近时，可以“逃逸”到这些载波上以避免 HeNB 的有害干扰。那些远离封闭接入模式 HeNB 的宏小区用户可以使用任何可用的载波。对于“逃逸载波”的配置如图 10.8 所示。

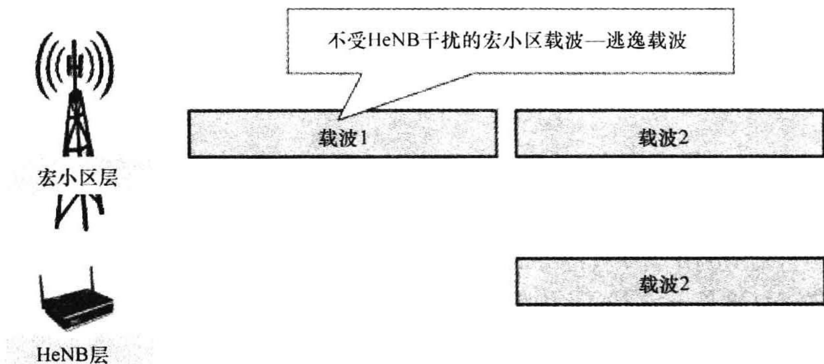


图 10.8　部署宏基站时的逃逸载波结构简图（假定有两个可用载波）

在部署 CSG HeNB 时，推荐采用配置“逃逸载波”和自治 HeNB 功率控制技术的方法。需要注意的是，考虑到部分宏小区用户在可用载波上会受到不同程度的干扰，而这种干扰程度的差异是由用户与非接入 HeNB 间的距离决定的，因此考虑上述干扰因素，可以在宏小区层面采用不同频率载波间的负载均衡技术来进一步“逃逸载波”配置优化。此外，配置 CSG ID 的用户在与之匹配的 CSG HeNB 上优先获得服务，尽可能把负载从宏基站转移到 HeNB 上。

10.4.3　宏基站和微基站/微微基站共存的场景

从干扰管理的角度分析，运营商在宏小区环境部署微小区基站（或微微小区基站）带来的问题少于部署 CSG HeNB。当一个宏小区用户移近同频部署的微微基站时，根据 A3 切换事件（3GPP TS36.331，2011），若微微基站的 RSRP 或 RSRQ 超过宏小区 eNB 的相应指标，用户即可切换到该微微基站（Pico eNB）。因而，微微基站或者微基站的同频部署通常不会带来覆盖漏洞的风险。所以业界公认的结论是：当宏基站（Macro eNB）与微微基站（Pico eNB）同频部署时，可以无需小区间干扰管理

技术而正常工作。然而，同频部署宏基站和 HeNB 时，需要根据用户是由宏基站服务还是由发射功率较小的微型基站服务来使用不同的上行用户功率控制参数。

虽然在进行宏基站和微微基站的同频部署时可以不采用任何干扰管理技术，但是采用下述的多种技术能够进一步优化系统性能。通过微微基站（Pico eNB）为更多的用户提供服务通常是提升系统整体性能的一种有效手段。在微微基站侧通过采用覆盖范围扩展（Range Extension，RE）机制，该机制是在 Pico eNB 的 RSRP/RERQ 上叠加一个该小区特有的 RSRP/RSRQ 偏置，使得微微基站可以服务更多的用户（详见图 10.9）。然而，值得注意的是，RSRP/RSRQ 偏置的设置将直接影响系统的整体性能：过高的小区 RSRP/RSRQ 偏置会使微微基站用户遭受同频部署的宏基站的下行干扰。减少宏基站对微微基站用户的干扰可以降低潜在的负载，进而提升系统整体性能。减小宏基站对微微基站用户干扰的最直接的方法是为宏基站和微微基站配置不同的载波，这样微微基站就不会受到宏基站的干扰，从而提高每个微微基站的覆盖范围。然而，这样的部署方法要获得系统整体的性能增益，需要有足够多的微微基站，若一个载频上只有几个微微基站，则不能有效利用频率资源。因此，在部署微微基站时，建议和宏基站同频部署。

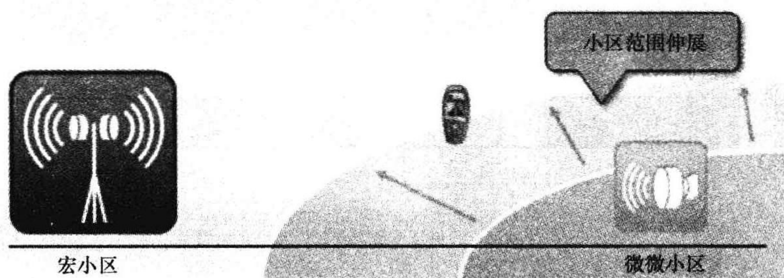


图 10.9　范围伸展

10.4.4　增强型时域干扰管理：eICIC

10.4.4.1　时域 eICIC 基本概念

3GPP R10 引入了异构场景中一种新的下行时域增强型干扰协调机制（eICIC，3GPP TS36.300，2011）。时域 eICIC 机制主要就是针对只有一个可用载波进行 LTE 部署的运营商所设计的，由于这类运营商不能为宏基站的微微基站配置不同的载波，从而进行较为简单的频域的干扰管理。由名称可知，TDM eICIC 在一个子帧上（1ms）进行时域干扰协调，如图 10.10 所示。其基本原则是：通过采用空白子帧（Almost Blank Subframes，ABS）从而实现在一些子帧上保持静默。ABS 只发射公共参考信号（Common Reference Symbols，CRS）和其他必须的公共信道信号，而不进行数据传输。因此，当一个小区发射 ABS 时，对其周围小区产生的干扰较小。由图 10.9 可知，在 CSG HeNB 发射 ABS 子帧时，HeNB 对其周边宏基站用户带来的干扰锐减。类似地，当宏基站发送 ABS 子帧时，微微基站用户受到的干扰降低，微微基站的覆盖范围增

大，这在宏基站的干扰很大时是无法实现的。

10.4.4.2 小区联合和 ABS 协调

如图 10.10 所示，为充分利用时域 eICIC 的优势，基站间需要一直保持时间同步，子帧间也需要协调一致。对于 FDD 模式，3GPP 对基站间的时间同步没有严格的要求，这取决于网络设备供应商时间同步方法和同步精度的选择。其次，不同类型小区间的 ABS 静默模式的有效协调和配置对于获得时域 eICIC 性能增益非常重要。而不同类型小区间的协调需要建立小区联合方法，举例如下：

1）某个微微基站的主要干扰源是哪一个宏基站。

2）不同 HeNB 位于哪个宏小区。

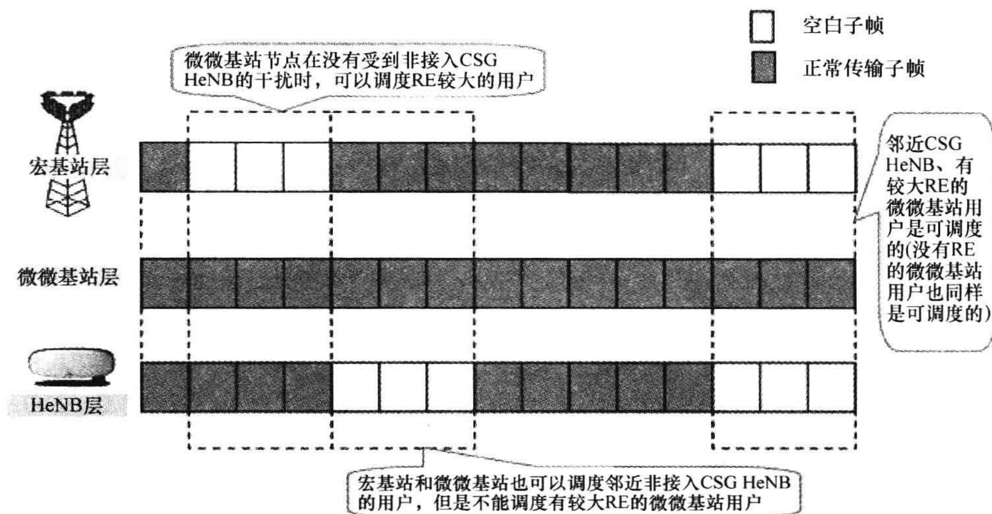


图 10.10 异构网络不同层间 ABS 校准的 TDM eICIC 概念

对于第一种情况，微微基站是否位于两个宏基站的小区边缘是有益信息。在这种情况下，两个宏基站原则上应该以协作的方式同时使用 ABS 来有效减少其对微微基站产生的干扰，如图 10.11 所示。3GPP R 10 中认为，小区关联应该在 OAM 中配置（这里需要注意，小区关联和邻小区列表密切相关）。这使得可以采用基于多种网络统计值采集（如用户切换数据和其他测量值）、用于半静态小区关联构建的集中式的 SON 功能。对于 HeNB 来说，还可以利用上报的网络监听模式（NLM）测量来估计例如 HeNB 部署在哪些宏小区内。

通常认为 HeNB 间、HeNB 和宏基站/微微基站间不存在 X2 接口，HeNB 的 ABS 静默模式由 OAM 集中进行半静态配置，从而 OAM 可根据所收集的网络统计数据调整 HeNB 的 ABS 模式以优化整网性能。值得注意的是，为达到最优性能，宏基站也需要知道 HeNB 所采用的 ABS 静默模式。基于此信息，当 HeNB 使用 ABS 时，宏基站在非接入 CSG HeNB 的覆盖范围内只对宏网用户进行调度。

对于已存在 X2 接口的宏基站和微微基站，ABS 静默模式的配置可进行动态协商和优化。为此，在 3GPP R 10 的 X2 接口应用层协议（Application Protocol，AP）中增

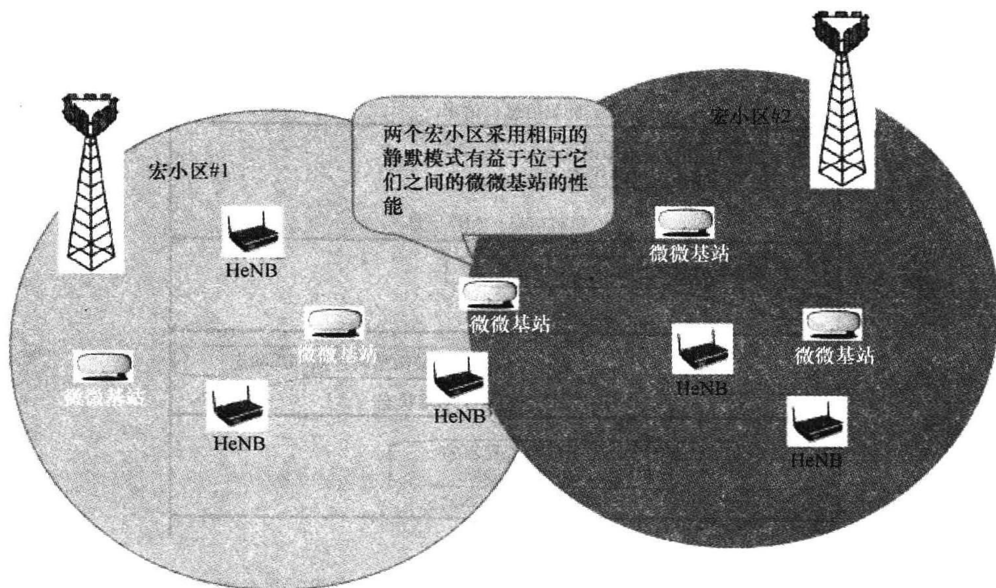


图 10.11　包含多种小区类型的典型异构场景下的小区关联图

加新的信息元素（Information Elements，IE），以便于基站间 ABS 静默模式的协作配置。3GPP TS 36.423（2011）中描述这些新增 IE 如下：

1）ABS 信息 IE：负载信息消息中的 IE，可以用于标识当前一个基站对其他基站所采用的 ABS 静默模式。

2）请求 IE：负载信息消息中的 IE，提供发射基站希望接收 ABS 信息的指示。

3）下行 ABS 状态 IE：资源状态响应消息中的 IE，用于表示 ABS 中为受其干扰保护的用户所分配的资源块的占比，也包括了由于其他原因不能使用的 ABS 资源块。进行百分比计算时分母可以从可用 ABS 信息中获得，上述更新可以通过在“资源状态请求信息”中增加“ABS 状态”的报告参数进行请求。

下面以宏基站和微微基站为例进一步说明这些新增的 X2 IE 的用法。如前所述，TDM eICIC 概念的提出是为了使一些子帧可以被配置为宏基站的 ABS，在这些子帧中允许微微基站为更大地域范围内的用户提供服务。宏基站决定采用 ABS 的子帧数目，一旦决定即向相邻的宏基站和微微基站发送 ABS 信息，使之获知该宏基站上采用的 ABS 静默模式。此信息有益于其他宏基站采用相似的 ABS 静默模式，同时也使得微微基站获知哪些子帧上受到较小的宏基站干扰。微微基站可以向宏基站发送请求 IE 消息，表明期望从宏基站接收 ABS 信息。如果微微基站发送请求 IE 信息，则说明宏基站将更多子帧配置成 ABS 模式会使微微基站获益。微微基站也可以发送包含 ABS 状态的资源状态更新信息，为宏基站配置最佳 ABS 模式提供额外信息。图 10.12 给出了宏基站和微微基站之间动态协作配置 ABS 静默模式的 X2 接口信令交互流程示例。

虽然 3GPP R 10 对用于宏基站间协作配置 ABS 静默模式的新增 X2 接口信令进行

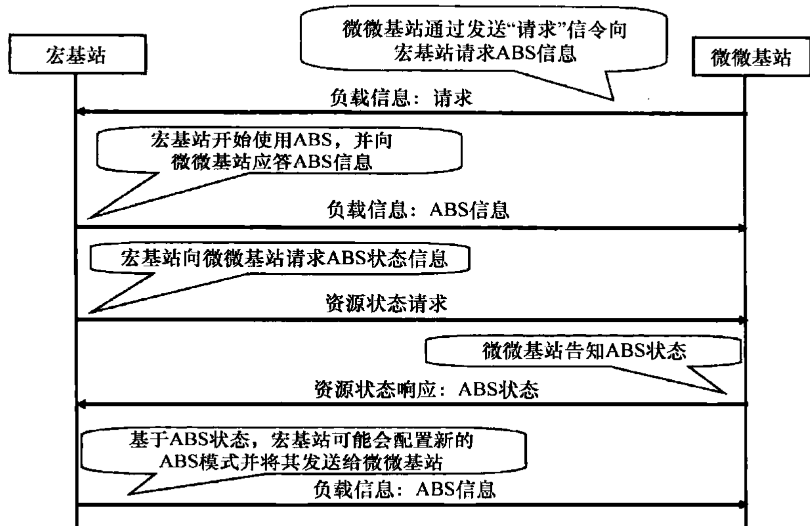


图 10.12　ABS 静默模式分布式动态协作的基站间 X2 信令流程实例

了标准化，但在实际实现中仍然具有一定的自由度。这从根本上意味着很大程度上供应商可自行设计具体的宏基站算法，如采用哪种 ABS 静默模式。

10.4.4.3　TDM eICIC 对终端的影响

使用配置 ABS 静默模式的 TDM eICIC 技术导致终端处剧烈的潜在干扰波动，取决于干扰 HeNB 使用正常传输或 ABS 传输。因此，3GPP R 10 中终端对如下测量支持时域约束的配置：

1）信道状态信息（Channel State Information，CSI）：由用户提供、被网络侧用于包调度和链路自适应决策的测量。CSI 包括信道状态指示（Channel Quality Indicator，CQI）、预编码矩阵指示（Precoding Matrix Indicator，PMI）和秩指示（Rank Indication，RI）。

2）无线资源管理（RRM）：由用户提供、被网络侧用于切换决策的测量。RRM 测量值包括如参考信号接收功率（Reference Signal Received Power，RSRP）、参考信息接收质量（Reference Signal Received Quality，RSRQ）。

3）无线链路检测（Radio Link Monitoring，RLM）：用于确定无线链路故障的测量值。

网络可以通过专用的无线资源控制（Radio Resource Control，RRC）信令为 3GPP R 10 用户配置上述测量约束，因此测量限制只适用于处于 RRC 连接模式的用户。受限的 RRM 测量配置尤其可使在具有 TDM eICIC 能力的网络中拥有优化的移动性触发器的用户获益。

3GPP R 8 和 R 9 的遗留用户不能如上所述的配置测量限制，这类终端在支持 TDM eICIC 技术的网络中的性能相对 3GPP R 10 用户会比较差。

10.4.4.4　时域 eICIC 概念小结

表 10.2 总结了 3GPP R 10 TDM eICIC 技术的主要特性。如前所述，这一干扰管理

理念主要是为只有一个 LTE 载波可用于多类型基站部署的运营商而开发。

10.4.5　未来干扰管理的展望

3GPP R 10 中干扰管理和干扰抑制的创新性方法正处于研究阶段，其中基于载波的自主干扰管理技术正处于开发阶段，根据不同因素为不同类型基站的最优可用频谱资源利用提供额外辅助。3GPP R 11 也在讨论 TDM eICIC 技术增强，包括引入有助于进一步提升网络整体性能的增强型用户接收机。如 10.4.1 节所述，异构网络具有高 DIR 的特征，因此可消除主要干扰的接收机，可以带来可观增益。

表 10.2　3GPP R 10 TDM eICIC 技术的优点、要求和特性

TDM eICIC 的优点	保护用户免受来自非接入 CSG 小区的干扰
ABS 特性	通过减少宏基站的共信道干扰获得对微微基站的负载均衡增益 ABS 是一些物理信道上发射功率较小（也包括无传输）或者活跃度较低的子帧。基站通过发射必要的控制信道、物理信息（如 CRS）以及系统信息来保证对用户的后向兼容性
时间同步	要求子帧在基站节点间实现严格的时间同步 3GPP FDD 模式无强制的时间同步要求，一些可选的实现，如 GPS 以及如 IEEE 精确时间协议标准 IEEE 1588 等基于回传的解决方案
ABS 静默模式配置	OAM 为 HeNB 静态配置 ABS 静默模式 宏基站和微微基站通过标准化的 X2 信令进行 ABS 静默模式的分布式动态协作。在选择静默模式时，要注意保护经常出现在某些子帧上的下行公共控制信道（如寻呼和 PBCH）和上行 HARQ
小区关联	由 OAM 配置，其中在动态协调 ABS 静默模式时，需要小区关联来配置需要交互 X2 信令的宏基站和微基站
网络 RRM	为了避免干扰，用户只由配置 ABS 模式的基站调度，此时需要更新基站的 RRM 功能，如 MAC 包调度器
用户需求	可配置 RLM、RRM 和 CSI 测量约束的 3GPP R 10 用户可以获得最优性能。相比具有 eICIC 机制支持的 3GPP R 10 用户，3GPP R 8 和 R 9 的遗留用户性能较差

10.5　自优化：移动性、MRO 和业务控制

10.5.1　移动鲁棒性优化

MRO 的总体目标是最小化由于错误的切换决策带来的 RLF 和掉话，避免不必要的切换（如乒乓效应）、优化空闲模式下的状态转移问题（需要随时能够“寻呼”到用户）。

第5章已经阐述了MRO相关内容，本节只讨论与标准之间的不同之处。首先讨论HeNB，因为HeNB与标准化内容的差别最大。本节最后会简单讨论微微基站场景和企业应用场景。

一个非常重要的问题是：为保证无缝切换，从宏基站到HeNB（或从HeNB到宏基站）的移动性管理如何设置才是合适的。事实上，如果成功完成了重建立流程，则切换中断和RLF几乎可以忽略。另外，由于位于宏基站和HeNB的小区边缘处的终端移动速率通常非常小，因此宏基站和HeNB间的移动性面临的挑战较小。

这里分析的是HeNB—宏基站小区的解决方案，不考虑5.1节描述的MRO的适用性问题。

3GPP为MRO提供了如下工具：

1）经由X2接口的RLF指示（3GPP R 9）：评估引发RLF的根源。

2）经由X2接口的切换报告（3GPP R 9）：评估引发RLF的根源。

3）经由X2接口的移动性交互流程（3GPP R 9）：协商切换参数。

4）经由Itf-N接口的KPI指标反馈（3GPP R 9）：向网管系统发送数据。

5）经由RIM交换/协商不同无线接入技术的参数：可能在3GPP R 11中讨论。

6）来自终端的RLF报告（3GPP R 9，在3GPP R 10中更新）：终端在RLF之前提供测量报告。

标准信息的定义并不指定实际的MRO修正位置，事实上可以采用不同的解决方案：

1）集中式：根源评估通过X2接口进行，但是实际的MRO修正在DM层面进行。

2）分布式：根源评估通过X2接口进行，但实际的MRO修正在各基站中运行（可能通过X2接口进行移动性交换）。

当在宏基站和HeNB间运行时（无X2接口，不同的域管理器），以上两种方法均存在问题。因此，宏基站和HeNB间的移动性参数有如下特点：

1）可保持默认值：可以为宏基站—HeNB场景定制配置专用的、性能良好的默认值。此外如前所述，宏基站与HeNB间出现的部分移动性问题是可以接受的。

2）可通过人工优化：至少可应用于移动性问题非常严重的HeNB。

3）可以通过本地算法进行优化（类似于分布式方式）：这就需要在当前宏基站MRO解决方案（带内移动性）的基础上进行HeNB特有功能的扩展。对于带外移动性，HeNB也需要类似的本地算法。需要注意的是，这种解决方案需要不依赖于3GPP R 9中通过X2接口进行根源评估的方法，但仍需要部分调整，如基于小区中HeNB的位置进行参数调整。

后一种解决方案采用了分布式方式，有较优的公平性。

之前的描述是针对LTE系统内部的应用场景，包括频带内和频带间，针对多无线接入技术场景的相应规范正在制定中。信息交互可通过RIM流程进行，相比于X2接口而言，这种方式能够适用于HeNB。因此，分布式无线接入技术间MRO解决方案虽然是为宏基站场景量身定制的，但也同样适用于HeNB场景。另一方面，集中式MRO再一次成为HeNB和宏基站域管理器间交互的问题，与前述LTE系统内部应用

场景相似。

3GPP R 10 在企业场景中支持 X2 接口，所以仍可采用分布式 MRO 解决方案。集中式解决方案严重依赖于数据模式扩展（BBF TR－069，2010）。至少在企业内部，即同一个企业的不同小区间，MRO 功能在很大程度上能够继续使用。

微微小区和宏小区的架构相同，即 X2 接口是可用的，因此可以采用分布式 MRO 解决方案。集中式方案则依赖于宏基站和微微基站中域管理器的交互。

10.5.2 多层业务控制及负载均衡

5.2 节描述的业务控制机制也同样适用于 LTE 多层网络。多层网络是拥有重叠覆盖小区的网络，通常是一个宏小区进行底层覆盖，在此基础上叠加一个或多个微小区以增加系统容量（见图 10.13）。叠加的多个微小区可以共享相同的载波（同频部署场景获得了网络资源较少的运营商的特别关注）或者位于不同的频段上。

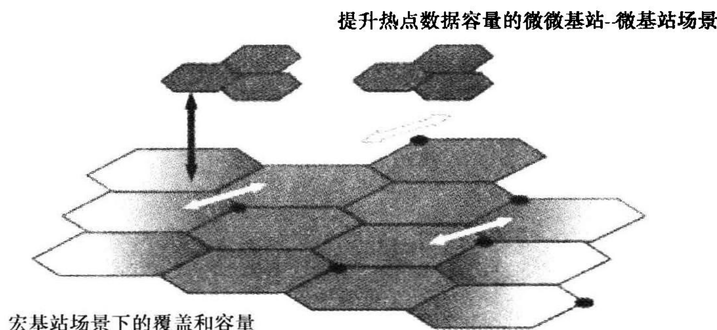


图 10.13 LTE 多层网络

移动性负载均衡（Mobility Load Balancing，MLB）的目标是优化不同层网络的业务量分发。5.2.4.4 节描述了 LTE 频段内和频段间（不同无线接入技术间）负载均衡的工具和方法。除了这些机制外，同频部署场景中由于两个网络层使用了相同的频段，需要特别注意。负载均衡技术通过聚集大部分业务需求提升了系统性能（即用户/小区吞吐量），若不采用负载均衡，这部分业务将越过微小区，由宏小区提供服务。

覆盖范围扩展技术（RE）通过简单的在 RSRP 或者 RSRQ 上加上小区偏移量（建议采用一个较小的 RE，约 3dB），以使微小区容纳更多的用户。如本章之前所述（见 10.4.3 节），在同频部署场景中，若不结合 eICIC 技术，RE 只能带来有限的性能提升。

10.5.3 与 IEEE 802.11（WiFi）的融合及协同

除 3GPP 蜂窝系统标准外，无线网络，如在未授权或者免除授权的频段上工作的 IEEE 802.11 家族（常称为 WiFi）网络的部署是应对不断增长业务的另一种选择。

从成本的角度来说，把数据业务从蜂窝空中接口分流到 WiFi 对运营商来说有极

大的吸引力，因为 WiFi 为终端用户提供了更高的带宽，且可在本地便捷部署。

终端或者用户驱动的 WiFi 业务分流技术已经获得应用，也就是说，用户通过手动方式把智能手机或掌上电脑连接到 WiFi 热点，蜂窝运营商在拥有 WiFi 基础设置的地方倾向于设置 WiFi 连接，由系统决定何时触发分流过程。

如 2.2.5 节所述，接入网发现和选择功能（Access Network Discovery and Selection Function，ANDSF）是一种使得运营商能够在所需区域优先使用 WiFi 热点的解决方案，该技术会对 3GPP（3GPP R9）对用户的认证和鉴权产生影响。

ANDSF 包括数据管理和控制功能，能够根据运营商的策略，为用户设备提供网络发现和选择功能。ANDSF 位于认证用户的归属运营商网络，接入该网络的信息可由用户端配置或者通过其他方式发现。

通过上述解决方案，WiFi 可以与 MNO 网络相融合，使得运营商可以制定接入网选择策略和基本的系统间移动性策略。虽然这是 3GPP 与非 3GPP 技术进行融合的一大进步，但与 3GPP 中不同无线接入技术间的优化不同，该解决方案不能提供诸如无缝切换及 QoS 保障等系统间互操作的增强性能，因此将无法采用 3GPP 技术中灵活的自优化机制。在第 5 章中提出的业务控制和负载均衡技术将不能应用于包含 WiFi 的场景。

参考文献

3GPP TS25.467 (2011) *UTRAN Architecture for 3G Home NodeB (HNB)*; Stage 2, ver.10.1.0.

3GPP TS36.300 (2011) *E-UTRA and E-UTRAN; Overall Description*, Stage 2, TS36.300, ver.10.3.0.

3GPP TS36.104 (2011) *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA), Base Station (BS) Radio Transmission and Reception*, ver.10.3.0.

3GPP TS36.331 (2011) *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) Radio Resource Control (RRC)*, Protocol specification.

3GPP TS36.423 (2011) *E-UTRAN X2 Application Protocol* (X2AP) ver.10.1.0.

3GPP TR36.921 (2011) *FDD Home eNode B (HeNB) Radio Frequency (RF) Requirements Analysis*, ver.10.0.0.

3GPP TR36.922 (2011) *TDD Home eNode B (HeNB) Radio Frequency (RF) Requirements Analysis*, ver.10.0.0.

Bandh, T. and Sanneck, H. (2011) *Automatic Site Identification and Hardware-to-Site Mapping for Base Station Self-Configuration*, International Workshop on Self-Organising Networks (IWSON), May, Budapest.

BBF TR-069 (2010) *TR-069 Amendment 3, CPE WAN Management Protocol, Broadband Forum*, November.

BBF TR-196 (2011) *TR-196 Amendment 1, Femto Access Point Service Data Model, Broadband Forum*, May.

NGMN (2010) *Top OPE Recommendations, NGMN P-OPE PROJECT*, September (ed. F. Lehser) NGMN Ltd., Reading.

第 11 章 未来研究展望

Christoph Frenzel、Henning Sanneck 和 Seppo Hämäläinen

SON 提供了一种可行高效的解决方案以应对 LTE 对移动网络运营所带来的诸多挑战（参见 1.1 节）。SON 可通过一系列自动化技术将网络运维人员从耗时繁复的人工操作中解放出来。随着移动网络研究工作的深入，新型无线网络架构及其关键技术的演进也催生了以提升用户体验为特征的增强型移动业务。然而，基于 SON 的网络管理所带来的各种优势必然要以技术复杂度的增加为代价。

本章主要介绍一种未来网络管理的演进模式，即认知无线网络（Cognitive Radio Network，CRN），以求在 SON 的基础上进一步加强网络运维过程中的自动化和灵活性，从而使得未来移动网络有序、高效地运行成为可能。

11.1 未来移动网络的应用场景

本节将呈现两种最有前景的未来无线网络架构蓝图及相关技术，同时对网络运行中的具体需求进行概述。

11.1.1 异构网络

如第 10 章所介绍的那样，包含多层次、多无线接入技术（RAT）的异构网络（Heterogeneous Networks，HetNet），是提升移动网络容量和范围（尤其在城市环境中）的具有潜力的典型网络架构。然而，HetNet 也会提升网络管理的复杂度：首先，由于 HetNet 额外引入了大量规模迥异的小区，需要管理的小区数目和种类显著增长；其次，作为一种新的网元类型，HeNB（Home eNB，HeNB）围绕终端用户分布，运维人员无法掌控其位置和运行时间，因此只能实现对 HetNet 的部分控制，这种非协调模式下的网络部署需要有灵活、自适应的网络管理支撑；最后，HetNet 的网络域包含了 HeNB 和 eNB 等不同节点，因此需要实现协同的网络运维。

11.1.2 云无线接入网

总体来说，当前有关移动网络架构方面的研究均以功能的分布式部署为导向，其目标在于将无线接入网和核心网中集中式网络实体的功能向 eNB 转移，以提高网络性能并减少成本。

近年来，出现了一种与上述网络架构演进方向不同的趋势，即基带云或者云无线接入网（C-RAN）。其目标在于将基带处理等功能从天线部分移到集中控制点，如图 11.1 所示。在距天线端达数千米的集中控制点，多个天线单元的基带处理部分形

成基带处理池。因此，天线部分仅由相对简单的无线射频（RF）单元组成，而通过光纤连接到集中控制点进行基带处理。

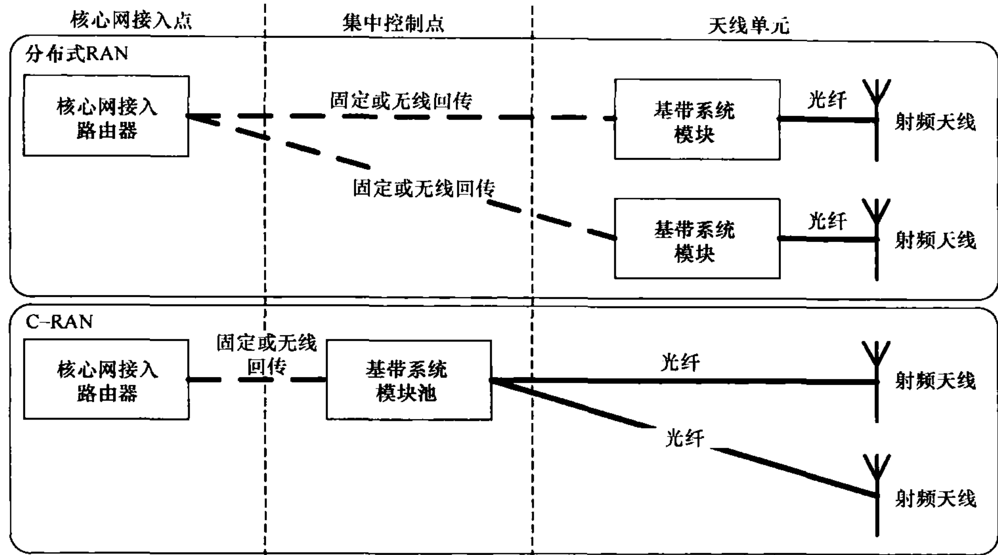


图 11.1　C－RAN 架构将基带系统模块从天线单元剥离，在集中控制点实现基带池

相对于传统无线接入网架构，C－RAN 具有如下潜在优势：

1）简单的天线单元具有价格低廉且易于维护的特征，从而降低了 RAN 的总体拥有成本（Total Cost of Ownership，TCO）。

2）集中化控制使得网络的软件集中升级成为可能，简化了网络运维。

3）基带硬件的集中化可实现不同区域间的网络负载均衡，如住宅区和商业区之间，从而有望降低初期投资、提高昂贵的硬件资源的利用率。

4）C－RAN 架构的网络扩展性能够通过负载均衡和移动性的改进而增强。属于集中控制点的小区间切换可以采用类似小区内切换的方式来处理，从而大大减少与核心网及网元间的信令交互。

5）C－RAN 能够多点协同发送接收（Coordinated Multipoint transmission and reception，参见 2.1.8.4 节），从而提升数据传输速率。

然而，集中控制点与天线单元间需要通过光纤连接，因此 C－RAN 也面临诸多严峻的技术和经济挑战。除了光纤连接造价昂贵外，C－RAN 对数据速率、时延抖动和时延不对称性的要求更为苛刻。另外，出于冗余保护的原因，单个天线将很可能通过多个连接与集中控制点相连，以避免单点故障。

C－RAN 的出现将会对网络管理带来新的需求。可以预见的是，运营商如果要引入 C－RAN，必然是一个循序渐进的过程。因此，未来的网络运营管理（Operation，Administration and Management，OAM）系统必须支持不同的无线网络模式，这无疑会增加整个网络的复杂度。

11.1.3　未来 OAM 系统需求

当前，移动通信领域已经开展了多项以提升未来移动网络性能并降低 TCO 为目标的技术研究。然而，无论是通过增加网元数目（如 HetNet）还是引入与原有系统共存的新技术（如 C-RAN)，均会导致移动网络管理的复杂度增加。复杂度的增加必然会对技术人员带来挑战，从而不可避免人为错误的出现。但另一方面，由于用户通常无法容忍由网络自身原因而导致的服务质量恶化，因此必须保证网络的高可靠性。此外，可以预见的是：移动网络的每比特收益将持续下降，在引入 SON 技术后，未来移动网络的运营成本（OPeration EXpenditure，OPEX）将有更为显著的降低。总之，一方面，未来的 OAM 系统可以通过降低复杂度以更好地协助人工进行网络运营；另一方面，通过引入更多自动化技术以降低 OPEX，提升移动网络的可用性。

11.2　认知无线网络

本节着重介绍 SON 的未来演进形态——认知无线网络，该网络能够满足未来移动通信网络的需求。因此，本节着重介绍认知无线网络的整体框架，并从人工智能方面介绍实现认知无线网络的关键技术。

11.2.1　从 SON 到 CRN

第 3 章主要介绍了 SON 的主要功能特征中移动网络的自运行和自管理功能。每一项功能的实现均需要依赖具体技术领域中大量复杂的算法。对于 SON 功能的配置，需要根据运营商的运营目标、网络环境及网络技术特征等目标需求，以高层参数配置和策略预制的方式进行。然而，如果运营需求更新频繁，不管从技能还是工作量方面均会给运营人员造成极大的压力；另一方面，从 11.1 节中介绍的未来网络应用场景中可以看出，网络运营需求呈现出极大的动态变化性。因此，SON 的概念并不能应对未来网络场景的应用需求。在此背景下，SON 将朝两个方向演进。

第一，SON 必须扩展其功能以支持以网络高层目标为导向的端到端移动网络管理。通过这种方式，运营商只需要从移动通信网络整体架构方面定义高层目标，而无需中断网络运行以更新 SON 的参数配置。这需要移动通信网络能够了解高层的需求目标，并以此调节网络配置。通过这样的方法，大大减少了管理复杂移动通信网络的复杂度。

第二，移动网络需要增加智能性以根据运营需求的变化调整网络自身配置，从而减少人工参与。该功能的实现，有赖于复杂的人工智能技术，尤其是机器学习领域的深入研究。

这两方面的功能扩展引出了认知无线网络的概念。

11.2.2　定义

认知的概念是指一个实体具有智能意识的活动，包括思考、推理及记忆（Merri-

am - Webster, 2003）。在网络领域，具有显著认知特征的就是认知无线电（CR）。认知无线电的概念最早由 Mitola 在 2000 年提出，而当前对其公认的定义则是 2003 年由美国联邦通信委员会给出的：认知无线电是一种可重配置的无线技术，其允许动态频谱接入及频谱复用。

近来，另外一个受到广泛关注的认知概念就是认知网络（Cognitive Networks, CN），该概念最早由 Thomas 等人于 2005 年提出：

认知网络需具有认知的过程，该过程包括获取当前网络状况信息，并基于这些信息进行推理、决策及执行。网络能够从每一次调整中进行学习，并利用学习得到的知识，结合端到端的目标需求，用于未来的决策。

需要指出的是，认知网络并不是特指移动通信网络，而是包含了所有的网络形态。

为了更好界定本章的内容，笔者借用认知网络的概念定义了认知无线网络（CRN），即认知无线网络依靠认知过程及学习能力完成端到端的目标。

认知无线电（CR）、认知网络（CN）及认知无线网络（CRN）这三种形式的区别在于它们所关注的网络实体及网络协议栈不同（Fortuna 和 Mohorcic, 2009）。图 11.2 简要阐述了 3 个概念的区别：认知无线电仅关注无线链路的物理层和 MAC 层，认知无线网络将其关注范围扩展到无线网络的所有协议栈，即无线接入和回程部分，而认知网络则是关注包含无线接入、核心网及传输网络的所有协议栈。

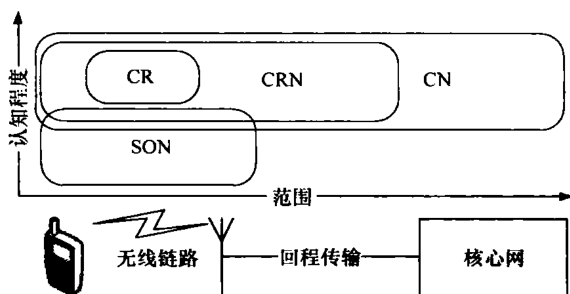


图 11.2　从关注范围及认知程度阐述 SON、CR、CRN 及 CN 的关系

本章余下部分主要针对认知无线网络（CRN）进行阐述。从关注范围方面考虑，CRN 显然是作为 SON 演进的最适合的选项，因为两者均重点关注无线接入网络部分。在一定意义上，CRN 可认为是能够提供自配置、自优化、自愈等功能的增强型 SON，并且这些能力的扩展是从端到端的角度通过经验学习实现的（Mahmoud, 2007）。CRN 与 SON 的这一关系也在图 11.2 中进行了描述。

11.2.3 网络架构

3.1 节列出了 SON 的愿景，并介绍了闭环自动网络管理的架构，该架构的主要思想是通过定义 SON 功能集，从而完成自动的网络管理，以避免过多的人工干预。但是，SON 功能仍然需要运维人员通过人工配置详细的参数和策略来实现。虽然如此，

但还是在一定程度上降低了运营商运维人员在日常事务中投入的精力，以更加关注网络管理的更高层面。

CRN 通过以高层目标为驱动的认知过程完成 SON 功能和工作流的配置，因此 SON 的网络管理环被认知网络的管理环所代替，图 11.3 阐述了由 Thomas 等人（2005）提出的一个简单的认知网络管理环，这个分层的认知网络架构清晰地将端到端目标需求、认知过程及其底层网络元素关联在一起。因此，一个 CRN 必须了解并掌握端到端的网络运行需求，并根据这些需求通过认知过程调整网络配置。最上面的一层代表诸如运营商所期望的小区容量等网络端到端的运行需求。通过认知规范语言（Cognitive Specification Language，CSL）将这些需求变成认知过程所能理解的机器语言。认知过程包含一个认知环，该认知环能够通过网络状态传感器获取网络状况信息，并能通过通用的网络应用程序接口（API）改变网络配置，从而实现端到端网络需求。API 是一个由软件自适应网络（Software Adaptable Network，SAN）提供的通用接口，它允许无人工干预的网元行为调整。因此，SAN 需要除软件无线电外更加灵活的网络元素，在一定意义上，这些网元必须支持如天线下倾角调节等自适应的软件调控功能。

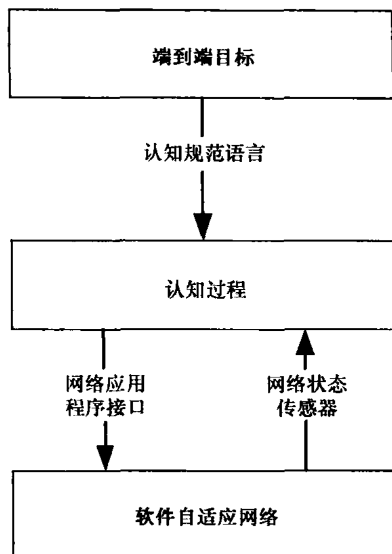


图 11.3 认知网络管理环
（Thomas 等人，2005，
得到 2005 IEEE 授权使用）

总的来说，认知过程中的认知环是一个环境感知、决策及网络调整以完成所给目标的控制环。然而为使得该控制环具有认知功能，需要加入对经验的学习能力及根据学习结果进行决策的能力。基于此方法，认知过程具备获得持续提升其有效性及效率的能力。

对于认知环的描述，多个参考资料已经给出了不同的控制环解释，如由 Thomas 等人提出的“观察—适应—决策—执行”环（2005），认知无线电中包含“观察、适应、规划、决策、执行和学习”的认知环（Mitola，2000）。然而图 11.4 中所述的由 Fortuna 和 Mohorcic 于 2009 年提出的认知过程环能更好地描述认知过程中的关键步骤。认知过程要持续地通过网络状态传感器检测网络环境的变化。一方面，这些所收集的信息用于制定各种潜在的策略，如施效动作集，网络如何根据所给出的端到端目标进行网络配置。另一方面，这些所感知到的信息用于进行学习以构建包含不同施效动作效果的知识库，这意味着系统不断检验并校准此前的施效动作，并从中学习以形成知识。在进行规划后，系统将进行决策，即根据端到端的目标及系统本身的经验决定将采取什么样的施效动作。这些规划策略通过网络 API 对网络进行施效。在认知环中，系统能从多个步骤中进行学习，并调整其知识库。因为该认知环非常复杂，当系

统需要快速对外界变化进行反应时，可以省略部分步骤，如若部分传感器输出的信息非常重要，则可以略过规划和决策过程而直接给其分配一个施效动作，从而使得系统能更快地根据外界信息进行调整。

CRN 并不依赖于具体的网络架构，因此认知过程的功能实体能够像 SON 功能一样采用集中式、分布式或混合式等方式进行部署，如 3.4 节所述，每一种网络部署模式均有其优缺点。

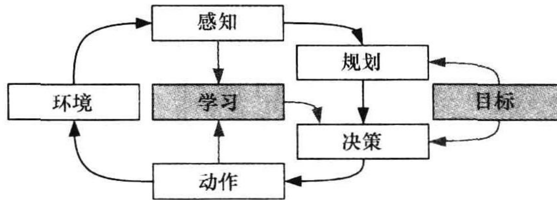


图 11.4 认知环（Fortuna 和 Mohorcic，2009，得到 Elsevier 许可改编）

11.2.4 人工智能技术

CRN 的实现有赖于各种复杂的人工智能（AI）技术。人工智能是计算机科学领域的一个重要研究方向，该方向关注计算机系统的智能行为（Russell 和 Norvig，2003），知识语义表达、推理及决策算法、学习机制等都是认知环中具体的研究内容。

11.2.4.1 知识表达

知识表达是指一种能够用来描述信息的语言，然而更重要的是，该语言需要能对概念的语义进行描述以方便推理，这种推理包括：对隐形语义的推断，获取来自显性语义的新信息，推理得到新的知识。知识表达需要具备用简单的数据格式进行语义上可区分的表述能力。

知识表达可进一步分为对确定知识的表述和推理及对不确定、随机信息的表达和推理（Russell 和 Norvig，2003）。对于前一种情况，可以从确定信息中得到一些合适的结论，例如，如果电灯不是开着的，那么它一定就是关着的。用来进行这一类型知识表达的是网络本体语言（Web Ontology Language，OWL）及其推理法则。针对不确定、随机信息的表达和推理，并不能从信息中得到确定的结论，而是能得到以一定概率发生的结论。例如，如果一个动物是鸟类，那么它极有可能会飞行，然而也存在不确定，如企鹅。对于这类知识表达方法，最著名的就是贝叶斯网络（详见 6.3 节）。

11.2.4.2 机器推理及决策

机器推理主要关注如何生成规划结果，如实现所给的最终目标的施效动作顺序。对于确定的环境，存在多种经典的推理方法（Russell 和 Norvig，2003），如基于前向状态空间搜索的推理方法，该方法由初始态开始搜索，连续地对所有施效动作进行尝试，直到搜索到目标状态。为了降低该算法在实际应用中的复杂度，通常会采用启发式搜索。另一种方法是将推理问题转化为命题公理集，并使用可满足性求解方法去寻找合理的推理结果。对于非确定情况下，推理变得更加复杂，但仍然有很多算法对其进行研究，其中较为典型的就是连续推理方法，通过该方法，系统产生确定环境下的

初始推理结果，当执行每一个可能的施效动作后，将其效果信息作为反馈，执行重推理步骤，从而调节规划结果以适应当前环境（Russell 和 Norvig，2003）。

通常情况下，不同的推理机制的算法质量也互不相同。如采取尽可能少的操作而达到用户的目标要求：在这种情况下，推理过程中包含的操作更少，从而具有更高的效率。同样地，不同的推理机制在似然性方面也不尽相同。多目标及不确定条件下最佳推理机制的选择有赖于以决策论为基础的决策机制，它融合了概率论和效用论，并综合考虑目标重要性和似然性，从而提出合理的推理方法（Russell 和 Norvig，2003）。在确定环境下，推理问题可以使用代数优化算法来解答。在非确定环境下，问题会变得更加复杂，但是可以使用影像图分析法或马尔科夫决策过程来进行解答。需要注意的是，推理和决策是互相交织的过程，这就是说，为引导推理过程，在推理中将不断地使用决策方法。一个特殊的案例就是：如果在环境中存在多个相互作用的实体，那么就可以采用博弈论以产生一种最大化系统全局效用的推理策略（Russell 和 Norvig，2003）。

11.2.4.3　机器学习

机器学习主要是从前期经验中进行反复训练以提升系统性能的机制。正如 Dietterich 和 Langley（2007）所述，机器学习能够用于多种任务，并成为 CRN 发展过程中一个重要的研究领域。在 11.2.3 节所阐述的整体框架中，由于机器学习能够在网络运行过程中不断获取新的知识，从而成为提升决策阶段有效性和效率的重要方法。根据反馈类型，机器学习算法通常可以分为三类：

1）监督学习法：该方法假定了包含直接反馈的用例集合，每个集合包括前提条件及相应结论。例如，系统可以通过一系列用例进行描述，每一个用例均包含了一个测量集合（前提条件）及一个网络失效状态（结论），测量集合与失效状态间通过映射函数进行关联。

2）非监督学习法：该方法认为系统并不会产生任何反馈，因此系统并不能从给出的前提条件中推断出任何结论。但是，它仍然具有一些数学特性，如分布特性或聚合特性，并能够从这些用例中产生环境的统计学模型。

3）强化学习法：该方法基于试误法，系统能够从其所采取的行为中得到激励。因此，当系统在处理一个用例时，首先决定采用什么样的行为，并根据该行为的有效性和效率产生激励。这个反馈结果可以用来进行策略学习以选择合适的施效动作。

11.3　应用

CRN 是在 SON 之后对未来移动通信网络进行管理的最具潜力的技术。如 3.1 节所述，SON 尝试着将自配置、自优化及自愈等自组织行为以 SON 功能特征的形式引入移动通信网络。这大大减轻了运营维护人员的工作负荷。但是，对 SON 系统的控制及对环境的适变仍然非常复杂。CRN 被认为是应对 SON 面临问题并进一步减轻运维人员压力的关键技术。本节将分别针对自组织行为的每项特征，阐述引入 CRN 方法后对 SON 功能的增强和提高。

11.3.1 自配置

SON 将自配置功能引入了移动通信网络（详见第 4 章及 10.3 节），在 SON 中，该项功能主要关注如何将具体的配置参数下载到处于初始状态的未配置基站。然而，这仍然需要人工进行复杂的推理决策以完成配置参数的设置。由于未来移动通信网络将由大量的基站构成，而这些基站中只有部分是直接受到运营商控制的，因此需要引入更加灵活、适变的方法以完成基站的自配置。

基于认知的自配置，其主要思想是通过 OAM 系统自动为处于初始状态的基站生成原始配置信息；在此之上，通过处于初始状态的基站对其周边环境、基站位置及运营策略的信息测量，进一步经过推理和决策生成配置策略；此后生成的配置信息下载到基站节点，如使用 SON 的自配置算法将生成的配置策略下载到基站。此后配置基站及其邻居基站将持续评估该策略的有效性，以不断增强和修正所得到的配置策略。因此，不同场景下的配置策略的性能将通过学习形成经验，从而用于下一次的基站部署配置。通过这样的方法，运维人员无需通过人工的方式进行初始配置参数的生成，而只需为新增节点定义其运行目标需求即可。

11.3.2 自优化

第 5 章表明已有大量的工作投入到针对提升移动网络效率的 SON 自优化技术研究。然而，对于自优化的研究仍有较多工作可以开展，因为当前的自优化技术的研究是一种静态的，并不能根据运营需求进行调整。例如，SON 的自优化功能通常只是通过微小的参数调整，监测网络性能波动以纠正一个次优化的配置策略，当某一特殊的配置问题多次发生时，通过直接采用此前的参数调整值以加快优化速度；此外，当前的算法并不能处理导致不良结果的不确定因素。因此，为保证优化质量，需要经验丰富的专家进行优化功能的配置。

通过引入复杂的人工智能技术，与 SON 中的自优化相比，CRN 中的自优化功能得到了增强。不确定知识语义描述支持对当前系统状态可能性的推断及导致当前性能问题的原因推断，如通过网络性能测量，推断出现问题是由于容量或次优的切换参数所导致；基于这一分析，系统会产生多套优化方案，通过能实现端到端目标的多种配置参数间的对比，并采用不确定因素下的决策方法进行分析，从而生成一个最优策略。在进行优化方案制定的过程中，认知过程持续对网络进行监测以评估不同行为的性能。系统将会不断地对这样的决策信息进行学习以提升基于认知的自优化功能的有效性及效率。

11.3.3 自愈

SON 中自愈功能主要是根据已配置信息与邻小区进行小区中断比较发现和诊断故障（详见 6.2 节和 6.3 节）。发现和诊断故障可认为是认知自愈环的第一步，因为发现和诊断过程已经引入了学习技术，如对全监测模式下测量与网络失效根本原因间的映射关系进行学习。但是，对于认知环的第二部分工作，即对最适合的恢复措施的

选择，仍然需要大量人工的参与。由于未来移动通信网络拥有比当前规模更为庞大的基站数目，发生故障几率也将随之上升，导致目前的自愈方法效率较低。因此，除了自动发现及诊断故障外，未来移动通信网络需要引入自动决策过程以决定采取合适的恢复动作。在此基础上，SON 的小区中断率的对比可认为是恢复行为中的一种可能情况。

自动恢复决策的目的是规划并决策产生最高效的应对措施，即对故障诊断的动作执行是在端到端目标需求控制下进行的。端到端目标需求可认为是一种类似最小化恢复代价的目标函数，或是小区不能在白天进行重启这样的限制条件。因此，恢复措施决策器需要根据移动网络运行的上下文信息进行决策，这些网络运行的上下文信息包括但不限于配置数据、性能数据及诸如日期和时间这样的运行数据。由于移动通信网络中故障解决呈现出较大的随机性，因此连续规划及决策论被认为是这种非确定条件下规划和决策问题的潜在解决技术。在所提出的方法中，学习机制发挥了重要作用。学习机制被用来持续地监测不同故障情况下恢复措施的有效性及效率，而这些信息将会用来进行未来的决策。因此，自愈功能将持续地对网络性能进行补偿，提升系统整体性能效果。

11.3.4 SON 运行

第 9 章阐述了多个 SON 功能在移动通信网络中无序的运行会导致冲突和矛盾。因此，SON 提出了采用协调模式控制 SON 功能运行，以完成网络运营的目标。协调功能通过人为制定的、细颗粒度的、用于刻画 SON 功能及目标集合的策略及参数来描述，而对这些策略的管理将耗费人力、物力，并极易出现错误。如果移动网络的运行目标发生了变化，为实现新的目标，需要通过人工进行策略和参数的更新调整。同样地，当有新的 SON 功能出现时，为保证无冲突的网络运行，也需要大量的运维人员以人工方式调整策略及参数。

CRN 由于采用了复杂的知识语义表达技术而克服了上述问题，因为知识表达允许对运行目标、网络特征、历史及当前网络状态等信息进行语义描述（Räisänen 和 Tang，2011）。通过使用这些知识语义信息，系统能够进行自动的推理从而生成针对具体 CRN 功能集的协调结果，实现端到端的网络运行目标。在此情况下，运行目标的变化将简单地翻译成系统知识的语义表达，并能够迅速采取行动。因此，对于当前只能人工探测到的 SON 功能间的冲突，在 CRN 中可以通过复杂的知识语义表达而实现自动探测（详见 9.1 节，表 9.1，类别 C）。

11.4 小结

未来移动网络技术使得 OAM 系统面临诸多新的挑战：在管理更大数量、更多类型的网络实体的同时降低 OPEX。SON 技术是实现上述宏愿的首要步骤。然而，上述需求已经超出了 SON 的理念所涵盖的能力范畴。因此，必须扩展 SON 技术的功能以提升网络运营的自动化，同时实现端到端的移动网络管理。无线认知网络（CRN），

作为一种全新的网络架构模式应运而生。

CRN 拟将一个感知环纳入网络实体以及 OAM 系统，通过感知现网情况，规划和制定应对策略，以实现所谓的端到端目标。在此过程中，系统对网络反应进行学习以优化后续决策。研究发现，源于人工智能研究领域的多种技术将有助于实现此愿景。

虽然 CRN 目前只是雏形，但其对 SON 的自组织特性的改善毋庸置疑。首先，自组织可通过对初始配置的长时间学习予以改进，从而避免了人工的规划过程。第二，基于认知的自优化可以通过学习和决策，缩减寻找最优配置的时耗。第三，CRN 可以通过拓展具有恢复策略规划的 SON 检测和诊断功能提供自愈能力，从而减少人工操作。最后，由于语义知识表达准许冲突的自动解决，CRN 的运营相对 SON 将有所简化。

参考文献

Dietterich, T.G. and Langley, P. (2007) Machine learning for cognitive networks: technology assessment and research challenges, in *Cognitive Networks: Towards Self-Aware Networks* (ed. Q.H. Mahmoud) John Wiley & Sons, Ltd., Chichester.

Federal Communications Commission (2003) Notice of Proposed Rule Making and Order (03-322), Technical report, Federal Communications Commission.

Fortuna, C. and Mohorcic, M. (2009) Trends in the development of communication networks: Cognitive networks. *Computer Networks*, **53**(9), 1354–1376.

Mahmoud, Q.H. (ed.) (2007) *Cognitive networks: Towards Self-Aware Networks*, John Wiley & Sons, Ltd., Chichester.

Merriam-Webster (2003) *Merriam-Webster's Collegiate Dictionary*, 11th edn, Springfield, MA.

Mitola, J. III (2000) Cognitive Radio – An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio, PhD thesis, Royal Institute of Technology (KTH) - Teleinformatics.

Russell, S.J. and Norvig, P. (2003) *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.

Thomas, R., DaSilva, L. and MacKenzie, A. (2005) Cognitive networks, *in* '2005 1st IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks', Baltimore, MD pp. 352–360.

Räisänen, V. and Tang, H. (2011) Knowledge modeling for conflict detection in self-organized networks, 3rd International ICST Conference on Mobile Networks & Management, Aveiro.

附录　英文缩略语对照表

缩略语	英　　文	中　　文
3G	3rd Generation (Cellular Systems)	第三代（移动蜂窝通信系统）
3GPP	3rd Generation Partnership Project	第三代合作伙伴计划
AAA	Authentication, Authorisation and Accounting function	鉴权、授权与计费功能
AAS	Active Antenna System	有源天线系统
ABS	Almost Blank Subframe	近空白子帧
AC	Admission Control	接入控制
ACS	Auto – Connection Server	自动连接服务器
AF	Amplify and Forward	放大并转发
AGP	Automatic Generation of Initial Parameters for eNodeB Insertion	（基站启动时）自动生成的初始化参数
AI	Artificial Intelligence	人工智能
ANDSF	Access Network Discovery and Selection Function	接入网发现和选择功能
ANR	Automatic Neighbour (s) Relation/Relationship setup	自动邻区关系建立
AP	Application Protocol	应用协议
APN	Access Point Name	接入点名称
ARCF	Automatic Radio Configuration Function	自动无线配置功能
ARRM	Advanced RRM	高级无线资源管理
AS	Access Stratum	接入层
ATM	Asynchronous Transfer Mode	异步传递模式
B3G	Beyond 3G	超三代移动蜂窝通信系统
BB	Basic Biasing	基本偏置
BCCH	Broadcast Channel	广播信道
BFD	Bidirectional Forward Detection	双向转发检测
BLER	BLock Error Rate	误块率
BP	Blocking Probability	阻塞率
BPM	Business Process Management	业务流程管理
BS	Base Station	基站
BW	BandWidth	带宽
CA	Carrier Aggregation	载波聚合

（续）

缩略语	英　　文	中　　文
CA	Certificate Authority	认证授权机构
CAC	Composite Available Capacity	复合可用容量
CBL	Case Based Learning	基于案例的学习
CBR	Case Based Reasoning	基于案例的推理
CBRA	Contention – Based RA	基于竞争的随机接入
CC	Component Carrier	分量载波
CCO	Coverage and Capacity Optimisation	覆盖和容量优化
CDF	Cumulative Distribution Function	累积分布概率
CIO	Cell Individual Offset	小区个体偏移量
CM	Configuration Management	配置管理
CMDB	Configuration Management DataBase	配置管理数据库
CMP	Certificate Management Protocol	认证管理协议
CN	Cognitive Networks	认知网络
COC	Cell Outage Compensation	小区中断补偿
COM	Cell Outage Management	小区中断管理
CoMP	Coordinated Multipoint transmission and reception	协作多点发射和接收
C – plane	Control Plane	控制面
CP	Collision Probability	冲突概率
CPE	Customer Premises Equipment	用户驻地设备
CPICH RSCP	Common PIlot CHannel Received Signal Code Power	公共导频信道接收信号码功率
CQI	Channel Quality Indicator	信道质量指示
CR	Cognitive Radio	认知无线电
C – RAN	Cloud RAN	云无线接入网
CRN	Cognitive Radio Networks	认知无线电网络
CRS	Common Reference Symbol	公共参考符号
CSG	Closed Subscriber Group	闭合用户组
CSI	Channel State Information/Indicator	信道状态信息/指示
CSL	Cognitive Specification Language	认知规范语言
DDDS	Dynamic Delegation Discovery System	动态委托发现系统
DF	Decode and Forward	解码转发
DIR	Dominant Interference Ratio	主导干扰比
DL	DownLink	下行链路
DM	Domain Manager	域管理器

（续）

缩略语	英　文	中　文
DMP	Detection Miss Probability	漏检概率
DNS	Domain Name System	域名系统
DRC	Dynamic Radio Configuration	动态无线配置
ECGI	E – UTRAN Cell Global Identification	E – UTRAN 小区全局标识
EDGE	Enhanced Datarates for GSM Evolution	增强型数据速率 GSM
eICIC	enhanced Inter – Cell Interference Coordination	增强型小区间干扰协调
EIRP	Equivalent Isotropic Radiated Power	等效各向辐射功率
EM	Element Manager	网元管理器
EMS	Element Management System	网元管理系统
eNB	evolved Node B	演进型基站
EPC	Evolved Packet Core	演进分组核心网
EPS	Evolved Packet System	演进分组系统
ES	Energy Saving	节能
ETSI	European Telecommunications Standards Institute	欧洲电信标准协会
E – UTRAN	Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network	增强型通用陆地无线接入网络
FBS	Flexible Base Station	灵活组网基站
FDD	Frequency Division Duplex	频分双工
FM	Fault Management	故障管理
GA	Genetic Algorithm	遗传算法
GBR	Guaranteed Bit Rate	保证比特速率
GNSS	Global Navigation Satellite System	全球导航卫星系统
GPS	Global Positioning System	全球定位系统
GSMA	GSM Association	GSM 协会
GUMMEI	Globally Unique MME Identifier	全局惟一 MME 标识符
GUTI	Globally Unique Temporary Identity	全局惟一临时标识
GW	GateWay	网关
HARQ	Hybrid Automatic Repeat reQuest	混合自动重传请求
HeMS	Home eNodeB Management System（LTE）	（LTE）HeNB 管理系统
HetNet	Heterogeneous Networks	异构网络
HII	High Interference Indicator	高干扰指示
HMS	Home NodeB Management System（3G）	（3G）HeNB 管理系统
HNB	Home NodeB（3G）	（3G）HeNB
HNB GW	Home NodeB Gateway	HeNB 网关

（续）

缩略语	英　文	中　文
HO	HandOver	切换
HOO	HandOver Optimisation	切换优化
HPO	Handover Parameter Optimisation	切换参数优化
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access	高速下行分组接入
HSPA +	High Speed Packet Access evolution	增强型高速分组接入
HSS	Home Subscriber Server	归属用户服务器
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access	高速上行分组接入
HW – ID	HardWare IDentity	硬件标识
ICIC	Inter – Cell Interference Coordination	小区间干扰协调
ICO	Interference Coordination Optimisation	干扰协调优化
IE	Information Element	信息单元
IMPEX	IMPlementational EXpenditures	执行开销
IMS	IP Multimedia Subsystem	IP 多媒体子系统
IP	Internet Protocol	因特网协议
IRP	Integration Reference Point	集成参考点
Itf – N	Interface – Northbound	北向接口
IS	Information Service	信息服务
ISCP	Interference Signal Code Power	干扰信号码功率
JRRM	Joint Radio Resource Management	联合无线资源管理
k – NN	k – Nearest Neighbour	K 最近邻分类算法
KPI	Key Performance Indicator	关键性能指标
KQI	Key Quality Indicator	关键质量指标
LAC	Location Area Code	位置区码
LBO	Load Balancing Optimisation	负载均衡优化
LIPA	Local IP Access	本地 IP 接入
LTE – A	Long – Term Evolution – Advanced	增强型长期演进
MAC	Medium Access Control	媒质接入控制
MAPE	Monitoring – Analysis – Planning – Execution	监测、分析、计划和执行
MBMS	Multimedia Broadcast and Multicast Service	多媒体广播和多播业务
MCC	Mobile Country Code	移动国家码
MCS	Modulation and Coding Scheme	调制和编码方式
MDT	Minimisation of Drive Tests	最小化路测
MGW	Media GateWay	媒体网关

（续）

缩略语	英　文	中　文
MLB	Mobility Load Balancing	移动负载均衡
MIMO	Multiple Input Multiple Output	多输入多输出
MME	Mobility Management Entity	移动管理实体
MNC	Mobile Network Code	移动网络码
MNO	Mobile Network Operator	移动网络运营商
MPLS	Multi – Protocol Label Switching	多协议标签交换
MSC	Mobile Switching Centre	移动交换中心
MRO	Mobility Robustness Optimisation	移动健壮性优化
MU – MIMO	Multi – User MIMO	多用户 MIMO
NAS	Non – Access Stratum	非接入层
NB	Node B	基站
NCBRA	Non – Contention – Based RA	基于非竞争的随机接入
NCL	Neighbour Cell List	邻区列表
NE	Network Element	网络单元
NGMN	Next Generation Mobile Networks	下一代移动网络
NLM	Network Listening Mode	网络侦听模式
NM	Network Management	网络管理
NMS	Network Management System	网络管理系统
NN	Neural Network	神经网络
NNSF	NAS Node Selection Function	NAS 节点选择功能
NR	Neighbour Relation	邻区关系
NRM	Network Resource Model	网络资源模型
NRO	Neighbour Relationship Optimisation	邻区关系优化
OAM	Operation, Administration and Maintenance	操作、管理和维护
OFD	Operational Fault Detection	运行故障检测
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	正交频分复用
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access	正交频分多址接入
OMC	Operation and Maintenance Centre	运维中心
OPEX	OPeration EXpenditure	运营成本
OSG	Open Subscriber Group	开放用户组
OSPF	Open Shortest Path First	开放最短路径优先
OSS	Operations Support System	运维支撑系统
OWL	Web Ontology Language	万维网本体语言

（续）

缩略语	英　文	中　文
PBLA	Push - to - Best Layer Algorithm	推向最佳层算法
PCEF	Policy Control Enforcement Function	策略控制实施功能
PCI	Physical Cell ID	物理小区标识
PCO	Protocol Configuration Options	协议配置选项
PCRF	Policy and Charging Resource Function	策略和计费资源功能
P - CSCF	Proxy - Call Session Control Function	代理呼叫会话控制功能
PDCP	Packet Data Control Protocol	分组数据控制协议
P - GW	Packet Data Network GateWay	分组数据网络网关
PHR	Power Headroom Report	功率余量报告
PHY	Physical Layer	物理层
PKI	Public Key Infrastructure	公钥基础设施
PM	Performance Management	性能管理
PMI	Precoding Matrix Indicator	预编码矩阵指示
PRB	Physical Resource Block	物理资源块
P - RNTI	Paging Radio Network Temporary Identity	寻呼无线网络临时标识
PS	Packet Scheduling	分组调度
PSF	Power Supply Factor	供电因子
QCI	Quality of Service Class Identifier	服务质量等级标识
QoS	Quality of Service	服务质量
RA	Random Access	随机接入
RAB	Radio Access Bearer	无线接入承载
RAC	Routing Area Code	路由区标识
RACH	Random Access CHannel	随机接入信道
RAN	Radio Access Network	无线接入网络
RAS	Remote Azimuth Steering	远程方位角转向
RAT	Radio Access Technology	无线接入技术
RB	Resource Block	资源块
RBS	Radio Base Station	无线基站
RE	Range Expansion/Extension	覆盖范围扩展
RET	Remote Electrical Tilt	远程电下倾
RF	Radio Frequency	射频
RFID	Radio Frequency IDentification	射频识别
RI	Rank Indication	（天线）矩阵的秩

（续）

缩略语	英　　文	中　　文
RIM	RAN Information Management	RAN 信息管理
RLF	Radio Link Failure	无线链路故障
RLM	Radio Link Monitoring	无线链路监控
RNC	Radio Network Controller	无线网络控制器
RRC	Radio Resource Control	无线资源控制
RRH	Radio Remote Head	射频拉远单元
RRM	Radio Resource Management	无线资源管理
RSRP	Reference Symbol Received Power	参考符号接收功率
RSRQ	Reference Symbol Received Quality	参考符号接收质量
RSSI	Received Signal Strength Indication	接收信道强度指示
SAE	System Architecture Evolution	系统架构演进
SAN	Software Adaptable Network	软件自适应网络
SBN	Smooth Bayesian Network	平滑贝叶斯网络
ScM	Self – configuration Management	自配置管理
S – CSCF	Serving – Call Session Control Function	服务呼叫会话控制功能
SDR	Software Defined Radio	软件无线电
SEG	Security GateWay	安全网关
SGSN	Serving GPRS Support Node	服务 GPRS 支持节点
S – GW	Serving GateWay	服务网关
SI	Study Item	研究项目
SIB	System Information Block	系统信息块
SINR	Signal to Interference plus Noise Ratio	信干噪比
SLA	Servic Level Agreement	服务等级协议
SOAP	Simple Object Access Protocol	简单对象访问协议
SOM	Self – Organising Maps	自组织映射
SON	Self – Organising Networks	自组织网络
SS	Solutions Set	解集
SU – MIMO	Single User MIMO	单用户 MIMO
SWG	Sub – Working Group	子工作组
TA	Tracking Area or Timing Advance	跟踪区或时间提前量
TAC	Tracking Area Code	跟踪区码
TAI	Tracking Area Identifier	跟踪区标识符
TAU	Tracking Area Update	跟踪区更新

（续）

缩略语	英　文	中　文
TCE	Trace Collection Entity	跟踪收集实体
TCO	Total Cost of Ownership	总拥有成本
TDD	Time Division Duplex	时分双工
TDM	Time DoMain	时域
TPM	Trusted Platform Module	受信平台模块
TrE	Trusted Environment	可信环境
TRX	Transmission and Reception Unit	发射和接收单元
TS	Technical Specification (3GPP)	（3GPP）技术规范
TSG	Technical Specification Group	技术规范组
TX	Transmission	发射
TXP	Transmission Power	发射功率
UE	User Equipment	用户设备
UL	UpLink	上行链路
UMA	Unlicensed Mobile Access	非授权移动接入
UMTS	Universal Mobile Terrestrial System	通用移动陆地系统
U - plane	User - plane	用户面
USIM	Universal Subscriber Identity Module	全球用户身份模块
UTRA	Universal Terrestrial Radio Access	通用陆地无线接入
UTRAN	Universal Terrestrial Radio Access Network	通用陆地无线接入网络
VET	Variable Electrical Tilt	可变电下倾
VLR	Visitor Location Register	访问位置寄存器
VoIP	Voice over IP	IP 电话
VoLTE	Voice over LTE	LTE 承载语音技术
WAN	Wireless Access Network	无线接入网络
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access	宽带码分多址
WI	Work Item	工作项目

国际视野　科技前沿

国际信息工程先进技术译丛

《LTE自组织网络(SON)：网络管理自动化提升运维效率》
《UMTS中的LTE：向LTE-Advanced演进》（原书第2版）
《微光学和纳米光学制造技术》
《RFID与传感器网络：架构、协议、安全与集成》
《信号统计分析方法 —— 生物医学和电气工程应用指南》（原书第3版）
《数值方法在生物医学工程中的应用》
《医疗电子仪器的设计与开发》
《第三代移动网络中的多播通信：服务、机制、性能》
《电力线通信技术与实践》
《现代通信原理》（原书第2版）
《认知无线电网络》
《高速数字系统的信号完整性和辐射发射》
《UMTS中的LTE：基于OFDMA和SC-FDMA的无线接入》
《全面的功能验证：完整的工业流程》
《无线Mesh网络架构与协议》
《UMTS蜂窝系统的QoS与QoE管理》
《半导体制造与过程控制基础》
《WCDWA原理与开发设计》
《下一代移动系统：3G/B3G》
《IMS:IP多媒体概念和服务》（原书第2版）
《下一代无线系统与网络》
《深入浅出UMTS无线网络建模、规划与自动优化：理论与实践》
《HSDPA/HSUPA技术与系统设计——第三代移动通信系统宽带无线接入》
《无线传感器及元器件：网络、设计与应用》
《印制电路板——设计、制造、装配与测试》
《IPTV与网络视频：拓展广播电视的应用范围》
《多电压CMOS电路设计》
《微电子技术原理、设计与应用》
《蜂窝网络高级规划与优化2G/2.5G/3G/…向4G的演进》
《基于蜂窝系统的IMS——融合电信领域的VoIP演进》
《无线网络中的合作原理与应用》
《移动电视：DVB-H、DMB、3G系统和富媒体应用》
《环境网络：支持下一代无线业务的多域协同网络》
《基于射频工程的UMTS空中接口设计与网络运行》
《未来UMTS的体系结构与业务平台：全IP的3G CDMA网络》
《UMTS-HSDPA系统的TCP性能》
《宽带无线通信中的空时编码》
《数字图像处理》（原书第4版）
《基于4G系统的移动服务技术》
《吉规模集成电路互连工艺及设计》
《高性能微处理器电路设计》



WILEY
www.wiley.com

上架指导　工业技术／电子信息／通信技术



ISBN 978-7-111-39936-0　定价：98.00元